

ENERGIA

**JOURNAL
OF ENERGY**

03/06

ENERGIJA

IZDAVAČ

Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb

ZA IZDAVAČA

Mr. sc. Ivan Mravak

POMOĆ U IZDAVANJU

Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa

UREĐIVAČKI SAVJET

Mr. sc. Kažimir Vrankić (predsjednik), Zagreb - doc. dr. sc. Ante Čurković, Zagreb - prof. dr. sc. Danilo Feretić, Zagreb - doc. dr. sc. Drago Jakovčević, Zagreb - mr. sc. Vitomir Komen, Rijeka - prof. dr. sc. Slavko Krajcar, Zagreb - prof. dr. sc. Siniša Petrović, Zagreb - mr. sc. Goran Slipac, Zagreb - dr. sc. Mladen Zeljko, Zagreb

UREĐIVAČKI ODBOR

Glavni urednik - Nikola Bruketa, dipl. ing., Zagreb
Glavni tajnik - mr. sc. Slavica Barta-Koštrun, Zagreb
Lektor - Branka Makovec, leksikograf, Zagreb
Metrološka recenzija - Dragan Borojević, dipl. ing., Zagreb
Prijevod - Hrvatsko društvo znanstvenih i tehničkih prevoditelja - Prevoditeljski centar, Zagreb

UREDNIŠTVO I UPRAVA

HEP d.d. - Energija
Uređivački odbor
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Telefoni: +385 (1) 6321963 i 6322641
Telefaks: +385 (1) 6322143 i 6170438
e-mail: nikola.bruketa@hep.hr; slavica.barta@hep.hr;
www.hep.hr

Godišnje izlazi 6 brojeva.
Godišnja pretplata bez PDV-a (22 %) iznosi:
- za pojedince 250 kn
- za poduzeća 400 kn
- za studente 60 kn
Žiro račun kod Zagrebačke banke broj:
2360000-1400129978

Godišnja pretplata za inozemstvo iznosi USD 95
Devizni račun:
Zagrebačka banka broj: 2000006299

Grafičko uređenje omota: mr. sc. Kažimir Vrankić, Zagreb
Grafičko uređivanje: Bestias dizajn d.o.o., Zagreb
Tisak: Intergrafika d.o.o., Zagreb

Naklada: 1 500 primjeraka
Godište 55(2006)
Zagreb 2006
Broj 3, str. 257-376

Oglašivači su veličine jedne stranice. Cijena oglasa je 3 000 kn bez PDV (22%).

ENERGIJA

PUBLISHED BY

Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb

PUBLISHER'S REPRESENTATIVE

Ivan Mravak, MSc

SUPPORTED BY

Ministry of Science, Education and Sport

EDITORIAL COUNCIL

Kažimir Vrankić, MSc, (Chairman), Zagreb - Assistant Prof Ante Čurković, PhD, Zagreb - Prof Danilo Feretić, PhD, Zagreb - Assistant Prof Drago Jakovčević, PhD, Zagreb - Vitomir Komen, MSc, Rijeka - Prof Slavko Krajcar, PhD, Zagreb - Prof Siniša Petrović, PhD, Zagreb - Goran Slipac, MSc, Zagreb - Mladen Zeljko, PhD, Zagreb

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief - Nikola Bruketa, dipl. ing., Zagreb
Secretary - Slavica Barta-Koštrun, MSc, Zagreb
Language Editor - Branka Makovec, Lexicographer, Zagreb
Metrology - Dragan Borojević, dipl. ing., Zagreb
Translation - Croatian Association of Scientific and Technical Translators - Croatian Translation Agency, Zagreb

HEAD OFFICE AND MANAGEMENT

HEP d.d. - Energija
Editorial Board
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Croatia
Telephone: +385 (1) 6321963 i 6322641
Fax: +385 (1) 6322143 i 6170438
e-mail: nikola.bruketa@hep.hr; slavica.barta@hep.hr;
www.hep.hr

Appears 6 times a year.
Annual subscription fee excl. VAT (22 %):
- for individual subscribers HRK 250
- for companies HRK 400
- for students HRK 60
Number of giro account with Zagrebačka Banka:
2360000-1400129978

Annual subscription fee for the overseas: USD 95
Number of foreign currency account with Zagrebačka Banka:
2000006299

Cover design: Kažimir Vrankić, MSc, Zagreb
Graphic layout: Bestias Dizajn d.o.o., Zagreb
Printed by: Intergrafika d.o.o., Zagreb

Circulation: 1,500 copies
Volume 55(2006)
Zagreb 2006
No 3, pp 257-376

Ads are the size of page. The price of an ad is HRK 3 000 excl. VAT.(22%)

SADRŽAJ

262-291

Petković, T.,
TESLINA IZUMI U FIZICI I NJEGOV INŽENJERSKI DUH
(izvorni znanstveni članak)

292-327

Kennedy, M., Stanić, Z.,
ULOGA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U BUDUĆOJ
OPSKRBI ELEKTRIČNOM ENERGIJOM
(pregledni članak)

328-351

Bičanić, K., Kuzle, I., Tomiša, T.,
NEKONVENCIONALNI MJERNI PRETVARAČI
(pregledni članak)

352-371

Milardić, V., Uglešić, I., Pavić, I.,
PRENAPONSKA ZAŠTITA OBJEKATA SPOJENIH NA
NADZEMNU NISKONAPONSKU MREŽU
(izvorni znanstveni članak)

Časopis je ubilježen u Ministarstvu znanosti, obrazovanja i sporta pod brojem 161 od 12.11.1992.

Časopis je indeksiran u sekundarnom bibliografskom izvoru INSPEC - The Institution of Electrical Engineering, England.



CONTENTS

Petković, T.,
TESLA'S INVENTIONS IN PHYSICS AND HIS ENGINEERING SPIRIT
(original scientific article)

Kennedy, M., Stanić, Z.,
THE ROLE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN FUTURE
ELECTRICITY SUPPLY
(review article)

Bičanić, K., Kuzle, I., Tomiša, T.,
UNCONVENTIONAL MEASURING TRANSducers
(review article)

Milardić, V., Uglešić, I., Pavić, I.,
SURGE PROTECTION OF BUILDINGS CONNECTED TO AN
OVERHEAD LOW-VOLTAGE NETWORK
(original scientific article)

The magazine is registered with the Ministry of Science, Education and Sport under No. 161 since 12.11.1992.

The magazine is indexed with the secondary reference source of INSPEC - The Institution of Electrical Engineering, England.

UREĐIVAČKA POLITIKA

Časopis Energija znanstveni je i stručni časopis s dugom tradicijom više od 50 godina. Pokriva područje elektroprivredne djelatnosti i energetike. Časopis Energija objavljuje izvorne znanstvene i stručne članke širokoga područja interesa, od specifičnih tehničkih problema do globalnih analiza procesa u području energetike.

U vrlo širokom spektru tema vezanih za funkcioniranje elektroprivredne djelatnosti i općenito energetike u tržišnim uvjetima i općoj globalizaciji, časopis ima poseban interes za specifične okolnosti ostvarivanja tih procesa u Hrvatskoj i njezinu regionalnom okruženju. Funkcioniranje i razvoj elektroenergetskih sustava u središnjoj i jugoistočnoj Europi, a posljedično i u Hrvatskoj, opterećeno je mnogobrojnim tehničko-tehnološkim, ekonomskim, pravnim i organizacijskim problemima. Namjera je časopisa da postane znanstvena i stručna tribina na kojoj će se kritički i konstruktivno elaborirati navedena problematika i ponuditi rješenja.

Časopis je posebno zainteresiran za sljedeću tematiku: opća energetika, tehnologije za proizvodnju električne energije, obnovljivi izvori i zaštita okoliša; korištenje i razvoj energetske opreme i sustava; funkcioniranje elektroenergetskoga sustava u tržišnim uvjetima poslovanja; izgradnja elektroenergetskih objekata i postrojenja; informacijski sustavi i telekomunikacije; restrukturiranje i privatizacija, reinženjering poslovnih procesa; trgovanje i opskrba električnom energijom, odnosi s kupcima; upravljanje znanjem i obrazovanje; europska i regionalna regulativa, inicijative i suradnja.

Stranice časopisa podjednako su otvorene iskusnim i mladim autorima, te autorima iz Hrvatske i inozemstva. Takva zastupljenost autora osigurava znanje i mudrost, inventivnost i hrabrost, te pluralizam ideja koje će čitatelji časopisa, vjerujemo, cijeniti i znati dobro iskoristiti u svojem profesionalnom radu.

EDITORIAL POLICY

The journal Energija is a scientific and professional journal with more than a 50-year tradition. Covering the areas of the electricity industry and energy sector, the journal Energija publishes original scientific and professional articles with a wide area of interests, from specific technical problems to global analyses of processes in the energy sector.

Among the very broad range of topics relating to the functioning of the electricity industry and the energy sector in general in a competitive and globalizing environment, the Journal has special interest in the specific circumstances in which these processes unfold in Croatia and the region. The functioning and development of electricity systems in Central and South East Europe, consequently in Croatia too, is burdened with numerous engineering, economic, legal and organizational problems. The intention of the Journal is to become a scientific and professional forum where these problems will be critically and constructively elaborated and where solutions will be offered.

The Journal is especially interested in the following topics: energy sector in general, electricity production technologies, renewable sources and environmental protection; use and development of energy equipment and systems; functioning of the electricity system in competitive market conditions; construction of electric power facilities and plants; information systems and telecommunications; restructuring and privatization, re-engineering of business processes; electricity trade and supply, customer relations; knowledge management and training; European and regional legislation, initiatives and cooperation.

The pages of the Journal are equally open to experienced and young authors, from Croatia and abroad. Such representation of authors provides knowledge and wisdom, inventiveness and courage as well as pluralism of ideas which we believe the readers of the Journal will appreciate and know how to put to good use in their professional work.

UVOD

INTRODUCTION

Dragi čitatelji,

tiskan je treći broj časopisa Energija u tekućoj godini - iskoristili smo to kao prigodu da otvorimo još nekoliko važnih pitanja iz područja elektroenergetike i elektroprivredne djelatnosti. U broju 3/2006 objavljujemo četiri članka:

- Teslini izumi u fizici i njegov inženjerski duh,
- Uloga obnovljivih izvora energije u budućoj opskrbi električnom energijom,
- Nekonvencionalni mjerni pretvarači i
- Prenaponska zaštita objekata spojenih na nadzemnu niskonaponsku mrežu.

Prvi članak još je jedan doprinos časopisa Energija obilježavanju 150. godišnjice rođenja Nikole Tesle i pokušaj osvjetljavanja njegovog djela i doprinosa na nešto drukčiji način od uobičajenih povijesno-činjeničnih osvrtu. Objavljeni članak, ograničavajući se na uže stručno područje, ukazuje na Tesline izume u fizici i njegov inženjerski duh nezadrživo usmjeren na praktičnu primjenu tih izuma. U članku je provedena moderna analiza unipol-antene za prijenos energije ili poruke na daljinu, na tragu fundamentalnih Teslinih istraživanja u Colorado Springsu i na Long Islandu.

Članak o ulozi obnovljivih izvora energije u budućoj opskrbi električnom energijom objavljujemo u vrijeme vrlo intenzivnih rasprava među energetičarima i neposredno prije donošenja važnih provedbenih propisa u Republici Hrvatskoj. Vjerujem da je slična situacija i u drugim tranzicijskim zemljama u okruženju, pa će poruke članka imati širu primjenu. Članak obrađuje europsku politiku i praksu s naglaskom na iskustva Velike Britanije i Hrvatske, kao primjeru zemlje s velikim iskustvima i primjeru zemlje s početnim iskustvima u zaštiti okoliša i, povezano s tim, poticanju korištenja obnovljivih izvora energije.

Hrvatska elektroprivreda promovira sve vrste doprinosa primjeni obnovljivih izvora enegije, kao što je i spomenuti članak. Na tom području ima i vrijedne vlastite rezultate, iskazane kroz gradnju brojnih hidroelektrana i dobrovoljni otkup električne energije iz obnovljivih izvora u vlasništvu privatnih investitora po znatno višoj cijeni od cijene vlastite proizvodnje. Učinjeno je to radi ohrabivanja

Dear readers,

In the current issue of Energija, 3/2006, we have taken the opportunity to address several important questions concerning the electrical power supply industry. This issue contains four featured articles, as follows:

- Tesla's Inventions in Physics and His Engineering Spirit,
- The Role of Renewable Energy Sources in Future Electricity Supply,
- Unconventional Measuring Transducers,
- Surge Protection of Buildings Connected to an Overhead Low-Voltage Network.

The first article is another contribution by Energija in commemoration of the 150th anniversary of the birth of Nikola Tesla, an attempt to illuminate his work and contributions in a manner that is somewhat different from the conventional historical-factual accounts. The current article limits itself to a narrow specialized area, presenting Tesla's inventions in physics and the orientation of his engineering spirit to their practical applications. The article also includes a modern analysis of the monopole antenna for the long-distance transmission of energy or messages, based upon Tesla's fundamental research in Colorado Springs and Long Island.

Our publication of the article on the role of renewable energy sources in the future of electrical energy supply coincides with a time of intense discussion among power supply experts and immediately prior to the adoption of significant legislation in the Republic of Croatia. I believe that our situation is similar to that of our neighboring transitional countries and, therefore, this article will have widespread applications. It discusses European policy and practice, with emphasis upon the experiences of Great Britain and Croatia in environmental protection, the former as a country with extensive experience and the latter as a country with initial experience, in connection with the promotion of the use of renewable energy sources.

Hrvatska elektroprivreda promote many types of contributions for the application of renewable energy sources, such as the current article. In this area it has had significant results, as evidenced by the construction of numerous hydroelectric power

investitora u razdoblju kada to još nije bilo uređeno energetske zakonodavstvom i provedbenim propisima, koji su pred neposrednim donošenjem.

Članak o nekonvencionalnim mjernim pretvaračima ukazuje na vrlo važan segment elektroenergetskog sustava, u kojem se može očekivati znatan razvoj s obzirom na danas primijenjena rješenja. Tehnološke i ekonomske okolnosti navode na kritičko promišljanje prikladnosti uporabe klasičnih mjernih strujnih i naponskih transformatora. Članak daje iscrpan prikaz alternativnih rješenja mjernih pretvarača koji bi, prema mišljenju autora, bili mnogo ekonomičniji i prikladniji za digitalne uređaje u sustavu mjerenja i zaštite. Očekujem da članak pomogne stručnjacima u prepoznavanju novih mogućnosti kada one budu komercijalno raspoložive.

Prenaponska zaštita objekata spojenih na nadzemnu niskonaponsku mrežu, promatrana u kontekstu tehničke funkcionalnosti i ekonomske prihvatljivosti, relativno je nova tema. Operator distribucijskog sustava u okviru svoje javne funkcije morat će ponuditi odgovarajuća rješenja korisnicima koji imaju potrebu povećane zaštite svojih instalacija. U objavljenom članku o prenaponskoj zaštiti dane su nužne teoretske podloge i predložena praktična rješenja za postupanje u praksi, uključujući i prijedlog originalne metode za izbor uređaja prenaponske zaštite.

Članke je pisalo devet autora. Autori su afirmirani znanstvenici i mlađi stručnjaci s fakulteta i iz prakse. Posebno nam je važna autorska participacija dr. sc. Malcolma W. Kennedyja, uglednoga britanskog energetičara. Vjerujem da će objavljeni članci i trud koji su uložili autori biti od koristi za čitatelje časopisa Energija.

Glavni urednik
Nikola Bruketa dipl.ing.

plants and the voluntary purchase of electrical energy from renewable sources that are under the ownership of private investors at significantly higher prices than the power it produces itself. HEP did this in order to provide encouragement to investors prior to the enactment of the Croatian energy legislation and practical regulations that are about to be adopted.

The article on unconventional measuring transducers presents a very important segment of electrical power systems, where significant development can be anticipated in comparison to the solutions being currently applied. The technological and economic circumstances require a critical assessment of the suitability of the use of classical current and voltage measuring transformers. The article presents an exhaustive presentation of alternative solutions for measuring transducers that, in the author's opinion, would be far more economical and suitable for digital equipment in systems for measurement and protection. I anticipate that this article will assist experts to recognize new possibilities when they become commercially available.

The surge protection of objects connected to an overhead low-voltage network, considered within the context of technical functionality and economic acceptability, is a relatively new topic. Within the framework of the public function, distribution system operator will have to offer suitable solutions to users who need additional protection for their installations. In the current article on surge protection, the necessary theoretical background is provided and practical solutions are proposed, including a proposal for an original method for selecting surge protection devices.

The articles were written by nine authors, including affirmed scientists and young professionals from academia and industry. We are particularly grateful for the contribution by Dr. Malcolm W. Kennedy, a distinguished British energetics expert. I believe that the articles in this issue and the efforts invested by the authors will prove to be of benefit to our readers.

Editor-in-Chief
Nikola Bruketa dipl.ing.

TESLINI IZUMI U FIZICI I NJEGOV INŽENJERSKI DUH

TESLA'S INVENTIONS IN PHYSICS AND HIS ENGINEERING SPIRIT

Prof. dr. sc. Tomislav Petković, Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska
Prof Tomislav Petković, PhD, University of Zagreb, Faculty of Electrical
Engineering and Computing, Unska 3, 10000 Zagreb, Croatia

U članku se opisuju Teslini izumi u fizici i njegov inženjerski duh, uz usporedbu s otkrivačkim duhom u elektromagnetizmu M. Faradaya i A. A. Michelsona. Promišlja se, povijesno-znanstvenom metodom, Teslin nedovršeni istraživački put od velikih pokusa u elektrotehnici i radiotehnici do fizikalne teorije koja bi se na njima zasnivala. Opisana su neka otkrića i pojedini pokusi koji su važni za kasniji razvoj akceleratorne tehnologije te Teslina unipol-antena elektromagnetskih valova velikih snaga i dosega u kojima se koristi princip Teslinog transformatora. U okviru klasične elektromagnetske teorije izvedeni su proračuni i moderna analiza sklopa za istraživanja Teslinog modela bežičnog prijenosa elektromagnetske energije ili informacije na daljinu, dokazujući znanstvenu utemeljenost tih Teslinih zamisli.

Dan je osvrt i na zastupljenost Tesle i njegovih izuma i doprinosa u nastavi fizike i elektrotehnike na Sveučilištu u Zagrebu, napose u udžbenicima i radovima Ivana Supeka, Vatroslava Lopašića i Tome Bosanca. Na kraju se protumačio Teslin interes za Goetheovom poezijom, što je stalno poticalo Teslinu težnju za izumima i spoznajom.

The article describes Tesla's inventions in physics. Tesla's engineering spirit is compared to M. Faraday's and A. A. Michelson's spirit of discovery in electromagnetism. Tesla's unfinished investigative journey, from great experiments in electrical technology and radio technology to the physical theories he derived from them, are examined historically and scientifically. Several discoveries and individual experiments are described that were significant in the subsequent development of accelerator technology, as well as Tesla's monopole antenna for high power and long-range electromagnetic waves, in which the principle of Tesla's transformer is applied. Within the framework of classical electromagnetic theory, calculations and modern analysis of the system for the study of Tesla's model of the long-distance wireless transmission of electromagnetic energy or information are presented, demonstrating the scientific basis for Tesla's ideas. The coverage of Tesla's inventions and contributions in the physics and electrical engineering curricula at the University of Zagreb is reviewed, especially in textbooks and other works by Ivan Supek, Vatroslav Lopašić and Tomo Bosanac. An interpretation is offered of Tesla's interest in Goethe's poetry, which provided an impetus for his inventions and desire for knowledge.

Ključne riječi: akceleratorna tehnologija, nastava fizike i Tesla, Teslina intuicija, Teslin inženjerski duh, Teslin model bežičnog prijenosa, Teslin transformator, unipol-antena
Key words: accelerator technology, monopole antenna, physics instruction and Tesla, Tesla's engineering spirit, Tesla's intuition, Tesla's model of wireless transmission, Tesla's transformer



Izvor: Muzej Nikole Tesle, MNT, VI/II, 65 MF006-02-065A
Source: Muzej Nikole Tesle, MNT, VI/II, 65 MF006-02-065A

1 UVOD

U Hrvatskoj je godina 2006. proglašena Godinom Nikole Tesle, s ciljevima suvremenog reafirmiranja Teslinih izuma u fizici i genijalnih istraživanja u elektrotehnici te potpunog osvjetljenja mjesta i uloge sveukupnoga Teslinog djela u svjetskoj znanosti i kulturi modernoga doba. Hrvatska politika zajedno s hrvatskom znanosti i umjetnošću napose želi sabrati sve činjenice i one vjerodostojne izvore koji upućuju na hrvatske korijene u zanimljivoj i višeslojnoj Teslinoj osobi i njegovu istraživačkom radu. Formalno uporište za proslavu Tesline godine u Hrvatskoj jest 150. obljetnica njegova rođenja koja pada u 2006. godinu. I UNESCO je 2006. proglasio Godinom Nikole Tesle, u čast 150. obljetnice rođenja toga genija moderne elektrotehnike i fizike.

Spomenutu odgovornu znanstvenu orijentaciju u proslavi Tesline godine u Hrvatskoj moralno podupire i jedan sićušni podatak: u izdanju Encyclopaedije Britannice (2004.) u natuknici Tesla, Nikola, u prvoj rečenici se navodi da je Tesla srpsko-američki izumitelj i istraživač (Serbian-American inventor and researcher), premda za mjesto rođenja stoji Smiljan, Hrvatska. S druge pak strane, u tablici parametara lunarnih kratera na webu NASA, uz Teslin krater navodi se Tesla kao hrvatsko-američki izumitelj (Croatian-American inventor).

Autor toga članka nije se posebno bavio Teslom i njegovim djelom i ne smatra se novopečenim teslogom. Imao je, međutim, prigodu kroz rad u svjetskim akceleratorskim središtima izravno uvidjeti i doživjeti poštovanje suvremenih fizičara i inženjera prema važnosti Teslinih istraživanja u razvoju moderne akceleratorne tehnologije. To je jedan od motiva za ovaj članak o Teslinim izumima i njegovoj inženjerskoj intuiciji. Drugi, ali ne manje važan motiv izvire iz želje da člankom o Tesli nastavi istraživati niz domaćih i svjetskih znanstvenika i/ili filozofa i umjetnika koje je povijesno-znanstveno i filozofski obrađivao u posljednjih desetak godina. U niz u kojemu su Albert Einstein, Enrico Fermi, Frane Petrić, Werner Heisenberg, Nikola Šop, Mirko Dražen Grmek i Hrvoje Požar [1] do [6] prirodno je dodati i Nikolu Teslu.

Nikola Tesla (Smiljan, 10. srpnja 1856.-New York, 7. siječnja 1943.) je svojim izumima i širokim spektrom svojih istraživačkih interesa, napose svojim osebnim stilom života, još za života priskrbio brojne epitete: od sanjara, ludog znanstvenika, znanstvenog fantastičara, inicijatora svjetskog bežičnog sustava i svjetske komunikacije do istraživača koji je primao signale od izvan-

1 INTRODUCTION

In Croatia, the year 2006 has been proclaimed Nikola Tesla Year, a contemporary reaffirmation of Tesla's inventions in physics and brilliant research in electrical engineering, and an opportunity to reassess and illuminate Tesla's overall contribution to world science and the culture of the modern age. Croatian politics, science and art want to collect all the facts and reliable sources that pertain to the Croatian roots of Tesla's complex personality and research endeavors. The formal occasion for the celebration of Nikola Tesla Year in Croatia is that the 150th anniversary of his birth occurs in 2006. UNESCO has also proclaimed 2006 as Nikola Tesla Year, in honor of the 150th anniversary of the birth of this genius of modern electrical engineering and physics.

Moral support for the scientific orientation of the celebration of Nikola Tesla Year in Croatia is provided by the small fact that although the first sentence of the entry Tesla, Nikola in the 2004 edition of the Encyclopaedia Britannica states that Tesla is a Serbian-American inventor and researcher, his place of birth is given as Smiljan, Croatia. Furthermore, in a table of the parameters of lunar craters on the NASA website, next to Tesla's Crater it is stated that Tesla was a Croatian-American inventor.

The author of this article has not been particularly involved with Tesla and his work and does not consider himself to be a newly minted expert on the subject. However, while working at world accelerator centers he has had the occasion to witness the high esteem that contemporary physicists and engineers have for Tesla's research in the development of modern accelerator technology. This is one of the motives for this article on Tesla's inventions and his engineering intuition. A second but no less important motive stems from the desire to continue a series written during the past decade on domestic and world scientists, philosophers and artists from the historical/scientific and philosophical points of view, including Albert Einstein, Enrico Fermi, Frane Petrić, Werner Heisenberg, Nikola Šop, Mirko Dražen Grmek and Hrvoje Požar [1] to [6], to which Nikola Tesla is a natural addition.

Nikola Tesla (Smiljan, July 10, 1856-New York, January 7, 1943), owing to his exceptional and broad spectrum of investigative interests and particular lifestyle, received many epithets during his life, including dreamer, crazy scientist, scientific visionary, the initiator of the world wireless system and world communication, the researcher who received signals from extraterrestrial civilizations, a man who could split the earth into two like an

zemaljskih civilizacija, čovjeka koji bi mogao raspoloviti Zemlju poput jabuke, tvorca razornih smrtonosnih zraka koje djeluju na daljinu...itd.

Tesla je u životu bio samac, genijalni izumitelj i osoba vrhunskih etičkih principa. U životu je najviše cijenio i poštivao svoje roditelje (otac Milutin, paroh), napose inteligentnu i priprostu majku (Đuka, rođ. Mandić) od koje je, prema vlastitim riječima, naslijedio izumiteljski dar. Tesla je imao tek nekoliko bliskih prijatelja pisaca, među kojima je bio i Mark Twain. Treba, međutim, naglasiti da su Teslu, uz briljantne izumiteljske sposobnosti, intuiciju i fotografsko pamćenje, resili perfekcionizam u poslu (pripremi i izvođenju eksperimenata) i samodisciplina u svakodnevnom životu (fizičke aktivnosti i zdrava prehrana).

Tesla je u Americi 1917. primio Edisonovu medalju, što je najveća počast koju dodjeljuje Američki institut inženjera elektrotehnike (AIEE). O 100. obljetnici Teslinog rođenja mjerna jedinica za gustoću magnetskog toka ili magnetsku indukciju u počast Tesli nazvana je tesla (simbol ili kratica T). Na XI. sastanku CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures), listopada 1960. u Parizu, mjerna jedinica tesla službeno je prihvaćena i ugrađena u korpus mjernih jedinica SI (Système International D'Unités) kao izvedena jedinica u elektromagnetizmu. Jedan od kratera na nevidljivoj strani Mjeseca, položaja 38,5N (širina) i 124,7E (dužina) te promjera 43 km, nazvan je po Tesli, što se drži velikim znanstveno-kulturnim priznanjem.

U povodu smrti Nikole Tesle od brojnih prigodnih brzojava izdvajamo onaj gospođe Eleanore Roosevelt u njezino i predsjednikovo ime te brzojave trojice nobelovaca: Roberta A. Millikana, Arthura H. Comptona i Jamesa Francka. Sva trojica nobelovaca, kao slavni eksperimentalni fizičari, jezgrovito su Teslu opisali kao jednog od najistaknutijih umova svijeta koji je zacrtao putove brojnim tehnološkim razvojem modernog doba.

Tesla je američko državljanstvo dobio 1891. godine, koja mu je bila napose plodonosna u smislu njegovih temeljnih izuma u polju visokofrekvencijskih Teslinih struja (Teslin svitak, predavanje s demonstracijom visokofrekvencijskog transformatora na Sveučilištu Columbia, New York), čime se ovaj članak posebno bavi. Tesla je održavao veze s rodnim krajem i narodom iz kojeg je poniknuo. Slavna i trajna jest njegova izjava: Ponosim se srpskim rodnom i hrvatskom domovinom.

apple, the creator of deadly penetrating long-distance rays etc.

Tesla was a loner, a brilliant inventor and a man of the highest ethical principles. He had the greatest respect and admiration for his parents. His father, Milutin, was the rector of a Serbian Orthodox parish. It was to his intelligent and unpretentious mother, Đuka née Mandić, that he attributed her gift for invention. Tesla had a few close friends who were writers, including Mark Twain. However, it should be emphasized that Tesla, besides his brilliant inventive abilities, intuition and photographic memory, was a perfectionist in his work (preparing and conducting experiments) and highly disciplined in his daily life (physical activities and healthful diet).

In 1917, Tesla received the Edison Medal, the highest honor awarded by the American Institute of Electrical Engineers (AIEE). On the hundredth anniversary of Tesla's birth, the unit of magnetic flux density or magnetic induction was named tesla (abbreviated as T) in his honor. In October 1960 in Paris, at the eleventh session of the General Conference on Weights and Measures (CGPM - Conférence Générale des Poids et Mesures), the unit tesla was officially accepted and included within the International System of Units (SI - Système International D'Unités) as the SI derived unit of magnetic flux density (or magnetic induction). One of the craters on the far side of the moon (latitude 38.5N, longitude 124.7E and 43 km in diameter) was named after Tesla, which is considered to be a high scientific and cultural honor.

On the occasion of Nikola Tesla's death, among the numerous telegrams we single out those from Mrs. Eleanor Roosevelt on behalf of herself and President Franklin Delano Roosevelt, and three Nobel Prize winners: Robert A. Millikan, Arthur H. Compton and James Franck. All three, as celebrated experimental physicists, described Tesla as one of the most distinguished minds of the world, who had outlined the paths for numerous technological developments of the modern age.

Tesla received American citizenship in 1891, a year that was otherwise particularly fruitful regarding his fundamental discoveries in the field of high frequency Tesla currents (the Tesla coil, and a lecture with a demonstration of a high frequency transformer at Columbia University, New York), which will be separately discussed in this article. Tesla maintained ties with his ethnic roots and birthplace, saying: I am proud of my Serbian lineage and Croatian homeland.

2 TESLIN INŽENJERSKI DUH – USPOREDBA S M. FARADAYEM I A. A. MICHELSONOM

Mnogi odgovorni povjesničari fizike u svijetu Teslu uspoređuju s Faradayem, a uporište usporedbi jest izostanak Teslinog formalnog matematičko-fizičkog obrazovanja, što je još jače naglašeno u slučaju s Faradayem. Teslin inženjerski duh dokazan je, poput Faradayevog, u jedinstvenom eksperimentalnom zanosu tijekom cijelog Teslinog života, s dominantnom orijentacijom na izume u fizici i elektrotehnici koje bi nakon pouzdanog otkrića trebalo teorijski obrađivati. Faraday i Tesla imali su gotovo podudarna filozofska gledišta o ulozi eksperimenata u razvitku znanosti. Eksperimenti su ključni za razvoj znanstvenih teorija i važan su izvor novih spoznaja, a ne tek alat za potvrđivanje ili opovrgavanje teorijskih formulacija.

U znanstvenoj javnosti, ponajviše u poljima eksperimentalne fizike čestica i akceleratorске tehnologije, veličanstveno se 1991. obilježila 200. obljetnica rođenja Michaela Faradaya (22. rujna 1791.-25. kolovoza 1867.). Povjesničari znanosti tada su nam ponovno približili Faradayevu akribičnost i pokazali njegovu istraživačku sustavnost kakva se rijetko susreće u čitavoj povijesti prirodnih i tehničkih znanosti. Faraday je u razdoblju između 1831. i 1862. katalogizirao u svoju laboratorijsku knjigu 16 041 zapis (Entries) svojih pokusa. Rezultat svih tih zapisa moguće je sažeti u fundamentalno otkriće elektromagnetizma, odnosno fizike u cjelini, da su sile svojstva polja. M. Faraday je izvornim inženjerskim pokusima, ali bez velikog znanja matematičke fizike svoga doba, omogućio fiziku polja koju je briljantno formulirao J. C. Maxwell 1864. godine. Govorimo o Faraday-Maxwellovom utemeljenju elektromagnetske teorije i klasične elektrodinamike koje su bile uzorom Einsteinovoj teoriji relativnosti te modernim teorijama polja u fizici čestica. Slavni Faradayev Dnevnik (Faraday's Diary, 7 svezaka, pokriva razdoblje od 1820. do 1862.) i njegova dopisivanja (Faraday's correspondence, više od 4 000 pisama koje je napisao Faraday ili koja su napisana njemu) ne svjedoče samo o eksperimentalnome stilu istraživanja polovicom 19. stoljeća nego su i putokazi za stvaralačko mišljenje u modernim tehnologijama. Tesline Zabilješke u Colorado Springsu (Colorado Springs-Notes) [7] i njegov opis vlastitih otkrića (My Inventions) [8] dragocjeni su izvori i primjeri za kreativno mišljenje u modernim tehnologijama, napose u informacijsko-komunikacijskoj tehnologiji. Teslin i Faradayev Dnevnik podjednako su zanimljivi i suvremenim kognitivnim znanostima.

2 TESLA'S ENGINEERING SPIRIT - A COMPARISON WITH M. FARADAY AND A. A. MICHELSON

Many reputable historians of physics in the world compare Tesla to Faraday. The reason for this comparison is Tesla's lack of formal training in physics and mathematics, which was even more evident in Faraday's case. Tesla's engineering spirit, like that of Faraday, manifested itself throughout his life as a passion for experimentation, predominantly oriented toward innovations in physics and electrical engineering that required theoretical analysis following their discovery. Faraday and Tesla had nearly identical philosophical attitudes regarding the role of experiments in science. Experiments are crucial for the development of scientific theories and important sources of new knowledge, not merely tools for the confirmation or refutation of theoretical formulations.

Among the scientific community, particularly in the fields of experimental particle physics and accelerator technology, the two hundredth anniversary of the birth of Michael Faraday (September 22, 1791-August 25, 1867) was celebrated magnificently during the year 1991. Scientific historians took the occasion to examine his scholarly, meticulous and systematic approach to research, the like of which has rarely been encountered throughout the entire history of the natural and technical sciences. During the period between 1831 and 1862, Faraday catalogued 16 041 scientific entries on his experiments in his laboratory log. The result of all these entries can be summarized in the fundamental discovery of electromagnetism, i.e. physics as a whole, that magnetic fields are characterized by lines of force. Through original engineering experiments but without extensive knowledge of the mathematics and physics of his day, M. Faraday made the development of the physics of the electromagnetic field possible, which was brilliantly formulated by J. C. Maxwell in the year 1864. We speak of Faraday-Maxwell's fundamental electromagnetic theories and classical electrodynamics that served as the model for Einstein's theory of relativity, and modern theories in the field of particle physics. Faraday's celebrated diary, consisting of seven volumes, covers the period from 1820 to 1862. His correspondence, consisting of over 4 000 letters he either wrote or received, testifies not only to the experimental style of research in the mid 19th century but also provides orientation for creative thinking in modern technologies. Tesla's notes in Colorado Springs (Colorado Springs — Notes) [7] and his description of his inventions (My Inventions) [8] are valuable sources and examples of creative thinking in modern technologies, particularly

Faraday je vjerovao da su prirodne pojave povezane i to je bila glavna nit njegovih istraživanja. Njegovi radovi i doprinosi protežu se po raznim područjima: od kemije i elektrokemije, elektrostatike i elektromagnetizma (inducirani napon, 1831.), eksperimentalne podloge teoriji polja do optike (zakret ravnine polarizacije polarizirane svjetlosti u jakom magnetskom polju, 1845.). Slika o Faradayu kao znanstveniku koji predano radi u podrumске laboratoriju Kraljevskog instituta nije potpuni i pravi njegov portret. Faraday eksperimentalac bio je i Faraday filozof, što se nepravredno zanemaruje u tumačenjima njegova života i djela. Njegova izvorna predodžba elektromagnetskog polja međusobno zatvarajućim silnicama (linijama) električnog i magnetskog polja pridaje mu ulogu fizičara koji je prvi znanstveno započeo dematerijalizaciju materije. Isto tako, mnogi istraživači Faradayevog života i djela drže da su Faradayeva kršćanska vjerovanja bila važna za njegovo znanstveno istraživanje. Faraday je bio članom male Sandemanističke sekte (Sandemanian sect), a uporište sekte je u doslovnom poimanju i tumačenju Biblije te moralnome vladanju u skladu s njom. Faradayevo zajedničko putovanje s H. Davyjem po europskim zemljama od studenoga 1813. do travnja 1815. drži se važnim elementom u formiranju njegove filozofije istraživanja. Sve ovo rečeno o Faradayu i njegovoj filozofiji istraživanja vrijedi manje ili više i za Nikolu Teslu.

Teslu možemo opravdano uspoređivati i s američkim eksperimentalnim fizičarom A. A. Michelsonom (Strzelno, Poljska, 19. prosinca 1852.-Pasadena, Kalifornija, SAD, 9. svibnja 1931.) kojemu je točno mjerenje brzine svjetlosti interferometrijskim pokusima bilo znanstvena preokupacija, kao što je Tesli bio bežični prijenos energije i informacije (Tesla World System). Godine 1878. Michelson je započeo s radom na problemu točnog mjerenja brzine svjetlosti, što mu je bila znanstvena strast do kraja života. Zbog usavršavanja u optičkim metodama 1880. putuje u Europu gdje provodi dvije godine u laboratorijima u Berlinu, Heidelbergu i Parizu. Godine 1884. Tesla putuje u suprotnom smjeru, ostajući u Americi do kraja života. Godine 1883. Michelson postaje profesorom fizike u Case školi primijenjene znanosti u Clevelandu, potpuno se posvetivši razvoju interferometra za mjerenje eterskog pomaka. Najvažniji Michelsonovi znanstveni doprinosi bili su prvo (1881., Berlin) i drugo (1887., Cleveland) mjerenje eterskog pomaka s nultim rezultatom (Michelson-Morleyev pokus), zatim dobivanje najtočnijeg podatka toga vremena za brzinu svjetlosti usavršenom metodom L. Foucaultovog rotirajućeg zrcala (1879.) te definicija i mjerenje etalona metra brojem valnih

information-communications technology. Tesla's and Faraday's diaries are equally interesting from the viewpoint of the contemporary cognitive sciences.

Faraday believed that natural phenomena are linked and this was the main thread of his investigations. His work and contributions cover various areas, including chemistry and electrochemistry, electrostatics and electromagnetism (induced voltage, 1831), the experimental basis for the electromagnetic field theory, optics (the rotation of the plane of polarization of a polarized light beam by a strong magnetic field, 1845). The picture of Faraday as a scientist who worked with dedication in the basement laboratory of the Royal Institute is not a complete and accurate portrait. The experimenter Faraday was also Faraday the philosopher, an aspect of his personality that is unjustly neglected in the explanation of his life and work. In light of Faraday's original concept of the electromagnetic field, with closed lines of force in the electric and magnetic fields, he should also be remembered as the first physicist to begin the scientific dematerialization of matter. Similarly, many scholars of Faraday's life and work maintain that Faraday's Christian faith was important in his scientific investigations. Faraday was a member of the Sandemanian sect, whose beliefs are characterized by a literal understanding and interpretation of the Bible as the basis for moral values and behavior. Faraday's travels with H. Davy through European countries from November 1813 to April 1815 are considered to be an important element in the formation of his philosophy of research. Everything that we have said about Faraday and his philosophy of research is also more or less applicable to Nikola Tesla.

We can also justifiably compare Tesla to the American experimental physicist A. A. Michelson (Strzelno, Poland, December 19, 1852- Pasadena, California, USA, May 9, 1931), for whom the precise measurement of the speed of light through interferometric experiments were his scientific preoccupation, as the wireless transmission of energy and information (the Tesla World System) was for Nikola Tesla. In the year 1878, Michelson began work on the problem of the precise measurement of the speed of light, which was to be his scientific passion until the end of his life. In order to pursue advanced studies in optical methods, in 1880 Michelson traveled to Europe and spent two years at laboratories in Berlin, Heidelberg and Paris. In the year 1884, Tesla traveled in the opposite direction, i.e. from Europe to the United States, where he remained until the end of his life. In the year 1883, Michelson became a professor of physics at the Case Institute of Technology in Cleveland, Ohio, and completely devoted himself to the development of interferometry for the measurement of aether drift.

duljina crvene svjetlosti iz pobuđenih atoma kadmija (1893.). Michelson je bio predsjednikom Nacionalne akademije znanosti SAD-a (1923.-1927.), a primio je i zlatnu medalju Kraljevskog astronomskog društva 1923. Krater na Mjesecu nosi Michelsonovo ime, a takva je čast dodijeljena i Tesli. Međutim, za konstrukciju interferometra koja nosi njegovo ime te za niz spektroskopskih i metroloških otkrića Michelson je 1907. dobio Nobelovu nagradu iz fizike, kao prvi Amerikanac u povijesti te nagrade. Tesla takvu čast nije dočekaao za svog života, niti posmrtno osim eulogijskih komentara nobelovaca o vrijednosti njegovog djela na Teslinu pogrebu u New Yorku.

U Teslinu inženjerskom duhu intuicija je bila odlučujuća. Ostavimo li po strani skolastičku tradiciju koja razlučuje intuitivnu od diskurzivne spoznaje, s obzirom na Tesline snažne vizije ili percepcije njegovih izuma (npr. trofazni sustav i rotirajuće magnetsko polje) i matematičku preciznost koja je u njima postojala, možemo reći da je Tesla imao dar kartezijanske intuicije. Tesline intuicije njegovih izuma, prema lat. intueri (pomno motriti, gledati, upirati oči u što) doista su bile očevodne, tim više što su mnoge vrlo uspješno primijenjene u tehnici i industriji. Teslino djelo broji oko 700 izuma (patenata), od kojih više od stotinu u području elektrotehnike i radiotehnike čine njegov najveći doprinos ne samo u tim područjima nego i u brojnim suvremenim tehnologijama (visokofrekvencijska rasvjeta, televizija, internet, mobitel).

3 TESLIN TRANSFORMATOR - IZVOR RF-POLJA VELIKE SNAŽE I TEMELJNI UREĐAJ ZA BEŽIČNI PRIJENOS ENERGIJE ILI PORUKE

Nikola Tesla je 20. svibnja 1891. na Sveučilištu Columbia, na konferenciji Američkog instituta inženjera elektrotehnike (AIEE), održao glasovito predavanje popraćeno briljantnim pokusima, pod naslovom: Eksperimenti s izmjeničnim strujama vrlo visoke frekvencije i njihova primjena u metodama umjetnog osvjetljivanja / Experiments with Alternate Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination. Povijest fizike i elektrotehnike priznaje Tesli pionirsku ulogu u prepoznavanju važnosti visokih frekvencija u istraživanjima električnih i magnetskih pojava (u teoriji polja), a napose u prijenosu energije i informacije te u metodama električne rasvjete. U predavanju Tesla vidovito stavlja naglasak na nove metode glade dobivanja

Michelson's most significant scientific contributions were the measurement of aether drift with the null result (the Michelson-Morley experiment, first performed in Berlin, 1881, and later in Cleveland, 1887), the obtaining of the most precise data of his time on the speed of light by perfecting the method of L. Foucault's rotating mirror (1879), and the defining and measuring of the archive meter according to the number of wavelengths of red light emitted from excited cadmium atoms (1893). Michelson was the president of the U.S. National Academy of Sciences (1923-1927), and also received the gold medal of the Royal Astronomical Society in 1923. A crater on the moon bears Michelson's name, an honor also given to Tesla. However, for the construction of the interferometer that bears Michelson's name, and for a series of spectroscopic and metrological discoveries, he was awarded the Nobel Prize in Physics in 1907, the first American in history to receive this prize. Tesla did not live to see such an honor during his lifetime, nor was there any such an honor after his death, although there were eulogies by Nobel Prize winners on the importance of Tesla's work at his funeral in New York.

In Tesla's engineering spirit, intuition was decisive. Leaving aside the scholastic tradition that distinguishes intuition from discursive cognition, considering Tesla's powerful vision or the perceptions of his inventions (for example, the three-phase system and the rotating magnetic field), and their mathematical precision, we may say that Tesla had the gift of Cartesian intuitions. Tesla's intuitions of his inventions, according to the Latin intueri, were more than evident, and many have been very successfully applied in technology and industry. Tesla's opus includes approximately 700 patents, of which over 100 are in the area of electrical engineering and radio technology, constituting his greatest contribution, not only in these areas but in numerous contemporary technologies (high frequency illumination, television, Internet and cell phone).

3 TESLA'S TRANSFORMER - THE SOURCE OF HIGH POWER RF-FIELDS AND THE BASIC DEVICE FOR THE WIRELESS TRANSMISSION OF ENERGY OR MESSAGES

On May 20, 1891, at a conference of the American Institute of Electrical Engineers (AIEE) held at Columbia University, Nikola Tesla presented a famous lecture, Experiments with Alternate Currents of Very High Frequency and Their Application to Methods of Artificial Illumination,

i prijenosa energije, osobito u proizvodnji svjetla jer stari teški strojevi za to više neće biti potrebni. U predavanju se dotiče i fundamentalnog pitanja o naravi elektriciteta u kontekstu teorije etera, 15 godina prije Einsteinove Specijalne teorije relativnosti, ali s izrazito fenomenološkim pristupom.

Tesla je predložio naziv vezani eter za elektricitet koji se javlja u molekulama, a koji je važan za nastajanje svjetlosti. Takvo gledište i naziv J. J. Thomson je smatrao pogrešnim. Međutim, valja naglasiti da je Tesla 1891. ispravno uočio da je nastajanje svjetlosti povezano s poremećajima statičkog električnog naboja u molekulama. Tesli nedvojbeno pripadaju povijesne zasluge da je prvi eksperimentalno pokazao, četiri godine nakon otkrića elektromagnetskih valova H. Hertza 1887. koji su bili predviđeni Maxwellovim jednadžbama 23 godine prije toga, da su visoke frekvencije i potencijali važni za nastajanje svjetlosti i topline (elektromagnetskih valova) bez dodatnih kemijskih procesa u toj tvorbi. Zadivljuje i Teslina intuicija o sveprisutnoj energiji i potrebi da se ona iskoristi za dobiti čovječanstva.

Na Sveučilištu Columbia Tesla je imao još jedno važno predavanje 16. svibnja 1888. o novome sustavu motora i transformatora s izmjeničnim strujama. Koliko su Teslina predavanja bila važna za razvoj fizike i elektrotehnike toga vremena, najbolje potvrđuje činjenica da je Sveučilište Columbia dodijelilo počasni doktorat (doctor in legibus) Nikoli Tesli 13. lipnja 1894. To je bio prvi počasni doktorat koji je Tesla dobio za svoje izume, najveći dokaz prepoznavanja važnosti njegovih otkrića u elektromagnetizmu. Nakon toga Tesla je primio više od deset počasnih doktorata na sveučilištima u Europi i SAD-u.

Teslin visokofrekvencijski transformator (*RF*-transformator) uistinu je bio prekretnica u razvoju moderne radiofrekvencijske tehnologije. Prisjetimo se Lodgeovih pokusa (Sir Oliver J. Lodge, 12. lipnja 1851. - 22. kolovoza 1940.) s elektromagnetskim titrajnim krugovima. Lodge je engleski fizičar, pionir radija i izumitelj koherera za otkrivanje širenja elektromagnetskih valova. Lodgeovi pokusi temeljili su se na dva razmaknuta titrajna kruga koji su bili sastavljeni od kondenzatora (Leydenska boca) i zavojnice od metalnog okvira. U prvome Lodgeovom titrajnom krugu Leydenska boca bi se nabijala pomoću induktora, a izbijala preko iskrišta kroz bakreni okvir koji je imao ulogu zavojnice. U drugome Lodgeovom titrajnom krugu, udaljenom od prvog, unutarnji i vanjski oblog Leydenske boce bili su spojeni okvirom od žice, ali tako da vertikalni pomični okvir može kliziti po vodoravnim žicama.

accompanied by brilliant experiments. The history of physics and electrical engineering recognizes Tesla's pioneering role in discerning the importance of high frequencies in the investigation of electrical and magnetic phenomena (in the electromagnetic field theory), especially in the transmission of energy and information, and in the methods of electrical illumination. In the lecture, Tesla prophetically placed emphasis upon new methods for obtaining and transmitting energy, especially in the production of light, because the old heavy machinery for this would not be necessary. In the lecture, a fundamental question is touched upon regarding the nature of electricity in the context of the Theory of Aether, fifteen years before Einstein's Theory of Relativity, but with a marked phenomenological approach.

Tesla proposed the name bound aether for the electricity that occurs in molecules, and which is important for the phenomenon of light. J. J. Thomson considers such a view and name to be in error. However, it should be emphasized that in 1891 Tesla correctly noted that the occurrence of light is connected with disturbances in the electrostatic charge of molecules. Tesla should undoubtedly be entitled to historical recognition that he was the first to demonstrate experimentally, four years after H. Hertz's discovery of electromagnetic waves in 1887 which was anticipated by Maxwell's equations twenty-three years earlier, that high frequencies and voltages are important for the occurrence of light and heat (electromagnetic waves) without additional chemical processes. Tesla's intuition regarding omnipresent energy and the need to harness it for the welfare of humankind is amazing.

At Columbia University, Tesla delivered another important lecture on May 16, 1888, on a new system for a motor and transformer using alternating current. The importance of Tesla's lectures in the development of the physics and electrical engineering of the time is best confirmed by the fact that Columbia University awarded an honorary doctorate (doctor in legibus) to Nikola Tesla on June 13, 1894. This was the first honorary doctorate that Tesla received for his inventions, the highest proof of the recognition of the importance of his discoveries in electromagnetism. Subsequently, Tesla received more than ten honorary doctorates at universities in Europe and the United States.

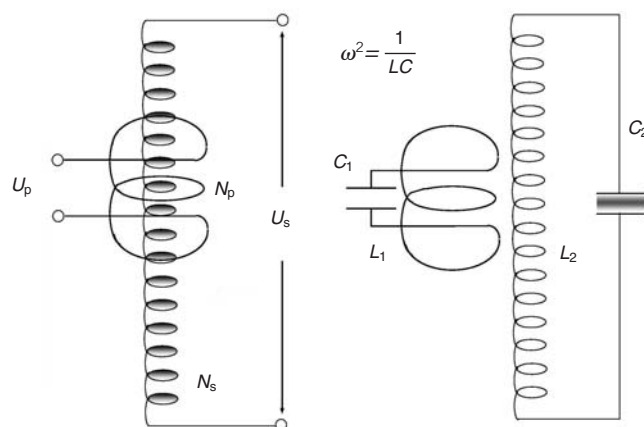
Tesla's high frequency transformer (*RF* transformer) was truly a breakthrough in the development of modern radio frequency technology. We recall the experiments by Sir Oliver J. Lodge (June 12, 1851 - August 22, 1940) using electromagnetic oscillating circuits. Lodge was an English physicist,

Time se induktivitet okvira i čitavog titrajnog kruga mogao mijenjati (namještati). Drugi titrajni krug imao je i malo pomoćno iskrište za detekciju titraja u drugome krugu. Kad je drugi titrajni krug bio blizu prvome i ako je pomični okvir bio na pogodnom (rezonantnom) mjestu, malo pomoćno iskrište bi probijalo pokazujući da naboj u drugome krugu titra jednakim titrajnim vremenom kao i u prvom. Kažemo da su Lodgeovi titrajni krugovi u rezonanciji jer silnice elektromagnetskih valova zahvaćaju i drugi okvir, što izaziva titranje naboja u drugom krugu. U kontekstu Lodgeovih pionirskih pokusa zrcali se Teslin domet. On je drugi titrajni krug premjestio u središte primarne zavojnice, otkrivši Teslin transformator. Bila je to Teslina revolucija u polju visokofrekvencijske tehnologije.

Teslin visokofrekvencijski transformator, bez karakterističnog željeznog jarma, jest rezonantni transformator sa sekundarnom zavojnicom pod visokim potencijalom. Primarna zavojnica s nekoliko zavoja dio je primarnog titrajnog kruga koje ima Teslino iskrište, a duga sekundarna zavojnica s mnogo zavoja s parazitskom kapacitivnošću između vlastitih zavoja ekvivalentna je visokofrekvencijskom rezonantnom krugu. Najveća transformacija napona i najbolje prilagođenje dobiva se kad je primarna zavojnica dio rezonantnog kruga i kad je ugođena rezonantnoj frekvenciji sekundarne zavojnice. Matematički to odgovara uvjetu: $L_1 C_1 = L_2 C_2$, koji se dobiva primjenom Thomsonove formule za rezonantno ugođene (povezane) titrajne krugove. Teslin transformator izvor je visokofrekvencijskih polja velikih snaga. Njegova nadomjesna shema s posebno označenom raspodijeljenom parazitskom kapacitivnošću sekundarne zavojnice (C_2) prikazana je na slici 1. Na slici 2 je prikazana školska izvedba Teslinog *RF*-transformatora koji se rabi u pokusima na predavanjima iz kolegija Fizike na Fakultetu elektrotehnike i računarstva (FER) te u nastavi fizike koja se na FER-u izvodi i za druge inženjerske fakultete Sveučilišta u Zagrebu.

radio pioneer and the inventor of the coherer electromagnetic wave detector. Lodge's experiments are based upon two oscillating circuits that are spaced apart, consisting of capacitors (Leyden jars) and rectangular loops. A high-voltage DC generator charges up the capacitor in the first oscillating circuit. At some point, the capacitor discharges via a spark gap into the rectangular loop that has the role of an inductor. In Lodge's second oscillating circuit, separated by a space from the first one, the inside and the outside surfaces of the Leyden jar were connected to the rectangular loop and a movable loop that could slide across the rectangular loop. In this manner, the inductance changes and the frequency of the oscillating circuit is tuned. The second oscillating circuit has an auxiliary spark gap to detect oscillation in the second circuit. When the second oscillating circuit is close to the first one, and if the movable loop is in the resonance position, sparks in the auxiliary spark gap are generated, indicating that the charge in the second loop is oscillating at the same frequency as in the first loop. We can say that Lodge's oscillating circuits are in resonance because the electromagnetic lines of force in the first and second loop are coupled, which generates the oscillation of the charge in the second circuit. Within the context of Lodge's pioneering experiments, Tesla's achievements can be appreciated. He moved the second oscillating circuit into the center of the primary coil, thus discovering the Tesla transformer. This was Tesla's revolution in the field of high frequency technology.

Tesla's high frequency transformer, without the characteristic iron core, is a resonant transformer with a high voltage secondary coil. A primary coil with several turns is part of the primary oscillating circuit together with the Tesla spark gap. The long secondary coil with many turns and stray capacitance between its turns is equivalent to a high frequency resonant circuit. The highest voltage and the best tuning is achieved when the primary coil is a part of the resonant circuit and when it is tuned to the resonant frequency of the secondary coil. This can be expressed as follows: $L_1 C_1 = L_2 C_2$, obtained by applying the Thomson equation for the resonant tuning (linkage) of the oscillating circuits. Tesla's transformer is a source of high-frequency high-power electromagnetic fields. An equivalent scheme of the transformer, with the distributed stray capacitance of the secondary coil (C_2) indicated, is presented in Figure 1. Figure 2 is a version of Tesla's *RF* transformer that is used in experiments during physics lectures at the Faculty of Electrical Engineering and Computing in Zagreb and in the physics instruction that the Faculty conducts for other engineering faculties of the University of Zagreb.



Slika 1
Nadomjesna shema
Teslinog
RF-transformatora
Figure 1
Equivalent scheme of
Tesla's RF transformer

Na krajevima duge sekundarne zavojnice dobiva se napon: $U_s = U_p \cdot N_s / N_p$, uz uvjet $N_s \gg N_p$ (brojevi zavoja sekundarne i primarne zavojnice). U svojim originalnim proračunima, prema Dnevniku istraživanja u Colorado Springsu [7], Tesla je određivao dužinu žice sekundarne zavojnice transformatora tako da odgovara četvrtini valne duljine elektromagnetskih valova u slobodnome prostoru.

The voltage at the end of the long secondary coil is as follows: $U_s = U_p \cdot N_s / N_p$ under the following condition: $N_s \gg N_p$ (the numbers of the turns of the secondary and primary coils). In Tesla's original calculations, according to his records in Colorado Springs [7], he determined the length of the wire of the secondary coil of the transformer so that it corresponded to a quarter of the wavelength of the electromagnetic waves in free space.



Slika 2
Školska izvedba
Teslinog
RF-transformatora
Figure 2
Version of Tesla's RF
transformer used in
schools

Na slici 2 se vidi induktor s ulaznim iskrištem koji ima ulogu da s oko 20 prekida u sekundi ($T \approx 0,05$ sekundi) stvara kratkotrajne pozitivne naponske impulse visine povrh 50 kV. Naponski impulsi nabijaju Leydensku bocu u primarnom titrajnom krugu (velika staklena boca na slici, s kuglom na kraju aksijalne šipke). Leydenska boca se preko iskrišta izbija kroz primarnu zavojnicu od sedam svitaka (Teslin oscilator s iskrištem). Uzduž osi primarne zavojnice suosno je smještena sekundarna zavojnica (žuti valjak na slici) čiji je

In Figure 2, there is an inductor with a spark gap at the entrance which creates short positive voltage impulses higher than 50 kV with approximately 20 interruptions per second ($T \approx 0,05$ seconds). The voltage impulses charge the Leyden jar in the primary oscillating circuit (the large glass bottle in the figure, with a sphere at the end of the axial rod). The Leyden jar discharges via the spark gap into the primary coil with 7 turns (Tesla's oscillator with a spark gap). The secondary coil is placed along the axis of the primary coil (the yellow cylinder in the

donji kraj uzemljen, a gornji završava kuglom za prilagođeno isijavanje elektromagnetske energije u slobodni prostor. Sekundarna zavojnica (Teslin *RF*-transformator) rezonantno je prilagođena frekvenciji primarnog titrajnog kruga.

Autor ovog članka je u svrhu točnih pokusa s demonstracijom Teslinog transformatora i njegovih primjena u bežičnom prijenosu energije i rasvjete na daljinu izvršio proračun rezonantne frekvencije transformatora i probojnog napona na kugli na slobodnom kraju transformatora (za opažanje Teslinih iskri). Iz geometrije primarnog svitka, zanemarujući rasipanja, izračunao se njegov induktivitet ($L = 0,188 \text{ H}$) koji s kapacitetom Leydenske boce ($C \cong 1 \text{ nF}$) po Thomsonovoj formuli daje rezonantnu frekvenciju titranja: $\omega_{\text{rez}} = 1/\sqrt{LC} = 72,93 \text{ kHz}$.

Transformator isijava *EM* valove frekvencije $f = \omega_{\text{rez}}/2\pi = 11,6 \text{ kHz}$, tako da se iskre s kugle transformatora bezopasno primaju metalnim elektrodama, a udaljene neonske cijevi pobuđuju na svijetljenje. Prema Teslinoj izvornoj relaciji (istraživanja u Colorado Springsu), za probojni napon kugle transformatora $V = 75\,400 \cdot r$, gdje je r polumjer kugle u centimetrima, izračunao se probojni napon: $V = 75\,400 \cdot 0,75 \text{ V} = 56,55 \text{ kV}$. Polumjer kugle školskog transformatora jest $r = 0,75 \text{ cm}$. Tesla je u Colorado Springsu 1899. kuglom od 40 cm dobivao napone od $3,016 \cdot 10^6 \text{ V} = 3,016 \text{ MV}$ i pomoću njih iskre koje se približavaju nebeskim munjama. Premda po dimenzijama i snazi školski, transformator sa slike 2 omogućuje zanimljive pokuse koji izazivaju veliki interes i oduševljenje studenata.

Fundamentalni Teslin izum za istraživanja elektromagnetskih pojava bio je i Teslin svitak (Tesla Coil). Riječ je o prstenastome zavojnici (jedan ili nekoliko zavoja) napravljenom od bakra ili nekog drugog vodiča. Kao sklop, to je, zapravo, oscilacijski transformator koji ima primarni i sekundarni transformator i strujni upravljač (iskrište). Kad svitkom teče visokofrekventna struja, magnetsko polje u svitku se vrlo brzo mijenja. Te promjene magnetskog toka obuhvaćene su zatvorenim silnicama električnog polja. Ako se svitak nalazi u razrijeđenom plinu (npr. zrak) i ako je jakost električnog polja dovoljno visoka, dolazi do izboja u plinu, pa se oko Teslinog svitka vidi svijetli ružičasti prsten koji oponaša oblik svitka, odnosno predočava zatvorene električne silnice. Tesla je svitak otkrio 1891., a on se i danas upotrebljava u radijskim i televizijskim uređajima te u mnogim elektroničkim uređajima.

photograph), the bottom end of which is grounded and the upper end terminates with a sphere for the adjusted radiation of the electromagnetic energy into the free space. The secondary coil (Tesla's *RF* transformer) is resonantly tuned to the frequency of the primary oscillating circuit.

For the purpose of precise experiments with a demonstration of Tesla's transformer and its application in the wireless long-distance transmission of energy and light, the author of this article has calculated the resonant frequencies of the transformer and breakdown voltage of the sphere at the free end of transformer (to observe Tesla's sparks). From the geometry of the primary coil, ignoring leakage, its inductivity is calculated ($L = 0,188 \text{ H}$) which together with the capacitance of the Leyden jar ($C \cong 1 \text{ nF}$) according to Thompson's formula yields the resonant frequency: $\omega_{\text{rez}} = 1/\sqrt{LC} = 72,93 \text{ kHz}$.

The transformer radiates *EM* waves of $f = \omega_{\text{rez}}/2\pi = 11,6 \text{ kHz}$, so that sparks from the transformer sphere are harmlessly received by the metal electrodes, and the neon tubes at a distance light up. According to Tesla's original formula (research in Colorado Springs) for the breakdown voltage of the transformer sphere: $V = 75\,400 \cdot r$, where r is the radius of the sphere in centimeters, the breakdown voltage is calculated: $V = 75\,400 \cdot 0,75 \text{ V} = 56,55 \text{ kV}$. The radius of the sphere of the school transformer is $r = 0,75 \text{ cm}$. In 1899 in Colorado Springs, Tesla obtained voltage of $3,016 \cdot 10^6 \text{ V} = 3,016 \text{ MV}$ with a 40 cm sphere, thereby obtaining sparks that approached flashes of lightning. Although of much smaller dimensions, the school transformer in Figure 2 permits interesting experiments that excite great interest and excitement among students.

Tesla's fundamental invention for the investigation of electromagnetic phenomena was the Tesla coil. It is a cylindrical coil (one or several turns), made of copper or some other conductor. It is actually an oscillating transformer with primary and secondary transformers and a current switch (spark gap). When high frequency current passes through the coil, the magnetic fields in the coil change very rapidly. These changes in the magnetic flux are coupled with the closed lines of force of the electrical field. If the coil is located in a rarified gas (for example, air) and if the intensity of the electrical field is sufficiently high, discharge into the gas occurs and a pink ring is seen around the Tesla coil that mimics the form of the coil or the closed electrical lines of force. Tesla discovered the coil in the year 1891 and it is used today in radio, television and many electronic devices.

3.1 Teslin transformator u razvoju akceleratorске tehnologije

U prikazu razvoja akceleratorске fizike čestica, napose tehnologije linearnih ubrzivača čestica, nitko nije tako sažeto i odgovorno prikazao ulogu Teslinog visokofrekvencijskog transformatora u tome razvoju poput prof. dr. Helmuta Wiedemanna iz Odjela za primijenjenu fiziku Sveučilišta Stanford i istraživača u stanfordskom laboratoriju sinkrotronskog zračenja [9]. U tome razvoju važnu ulogu i danas imaju izvori *RF*-polja odgovarajuće snage. Prekretničku ulogu odigrao je baš Teslin *RF*-transformator bez željezne jezgre, prije svega visoki naponi koji se mogu dobiti s kraja njegove sekundarne zavojnice. Tijekom jedne polovice perioda oscilacija napona na sekundarnoj zavojnici napon se rabi za ubrzavanje pulsa (snopa) čestica u kanalu akceleratora. Ta se metoda, dakako, u vrhunskoj tehnologiji upotrebljava danas, napose u supravodičkim akceleratorima elektronskih snopova.

Opisat ćemo je ukratko na primjeru Thomas Jefferson Accelerator Facility, jednog od najpoznatijih supravodičkih elektronskih akceleratora u svijetu. U njemu se izvode temeljna istraživanja u fizici čestica i nuklearnoj fizici na kvarkovskoj osnovici supravodljivosti, fizici materijala i površina, fizici lasera, pa do primijenjenih istraživanja u medicini i biotehnologijama sve do raznih industrijskih primjena. U glavnome kanalu u obliku izdužene elipse, dužine oko 1 milje (oko 1,6 km), nalaze se dva linearna ubrzivača elektrona (tzv. sjeverni i južni linac) koja zajedno imaju 320 radiofrekvencijskih rezonatora (rezonantne šupljine, tzv. *RF Cavities*) u supravodičkoj tehnologiji (materijal niobij Nb, kritična ili prijelazna temperatura u supravodljivo stanje $T_k = 9,3$ K). U svakom ubrzivaču povećava se energija elektronskog snopa za 400 MeV. Milijardu puta (10^9) u sekundi ubacuje se (fokusira) milijun (10^6) elektrona tako da se dobije elektronski snop debljine ljudske kose (promjer oko 200 μm). Ubrzavanje elektrona u rezonatorima se izvodi pomoću *RF*-polja. Elektronski snop se linearno ubrzava kroz kanal tako da sinkronizirano nailazi svaki put na padajuću stranu pozitivnog poluvala *RF*-signala uzduž aksijalne osi rezonatora.

U znanstvenoj i tehnološkoj grani primjene radiofrekvencija u linearnim ubrzivačima događa se, u naše vrijeme, vrlo zanimljiv tehnološki razvoj i otkriće. Razvoj se zbiva oko glavnog problema: ostvarenje što većeg gradijenta ubrzavanja čestica u linearnim ubrzivačima, iskazano u jedinicama MV/m (megavolt/metar). Cilj je predati što veću energiju čestici (snopu) po jedinici duljine rezonatora u kojemu se ubrzavanje događa. U supravodičkim linearnim ubrzivačima

3.1 Tesla's transformer in the development of accelerator technology

In the presentation of the development of accelerator particle physics, especially the technology of linear particle acceleration, no one has so concisely and responsibly presented the role of Tesla's high frequency transformer as Prof Helmut Wiedemann, PhD, from the Department of Applied Physics, Stanford University, at the Stanford Synchrotron Radiation Laboratory [9]. In such development, sources of *RF* fields of suitable power also have an important role today. Tesla's *RF* transformer without an iron core was a breakthrough, especially due to the high voltages that can be obtained from the end of its secondary coil. During a half-period of voltage oscillation on the secondary coil, the voltage is used for accelerating the pulses of the particles (beam) in the accelerator channel. This method is particularly used in high technology today, especially in superconductor accelerators of electronic beams.

We shall describe it briefly, using the example of the Thomas Jefferson National Accelerator Facility, one of the most famous superconductor electronic accelerators in the world, where basic research in particle physics and nuclear physics is being conducted based upon quark models, superconductivity, the physics of materials and surfaces, the physics of lasers, applied research in medicine and biotechnologies, and various industrial applications. In the main channels in the form of an elongated ellipse, approximately 1 mile in length (approximately 1,6 km), there are two linear electron accelerators (so-called north and south linac) that together have 320 *RF* cavities in superconducting technology (material niobium Nb, critical or transition temperature to the superconducting state $T_k = 9,3$ K). In each accelerator, the energy of the electronic beam is increased by 400 MeV. A billion (10^9) times per second it focuses a million (10^6) electrons in order to obtain an electronic beam of the thickness of a human hair (a diameter of approximately 200 μm). The acceleration of the electrons in the resonators is achieved using an *RF* field. The electronic beam is accelerated linearly and synchronously arrives at the descending positive half-wave of the *RF* signal along the axial axis of the resonator each time.

In branches of science and technology, very interesting technological developments and discoveries are occurring in our times involving the applications of radio frequencies in linear accelerators. There have been developments concerning the central problem, achieving the maximum possible gradient of particle acceleration in linear accelerators, expressed in units of MV/m (megavolt/meter). The goal is to deliver the

(Superconducting Linear Collider) koji danas operiraju na -271°C (2,15 K) gradijent ubrzanja tipično iznosi 28 MV/m. Najnovijim tehnološkim razvojem u Jeffersonovu laboratoriju u 2006. godini omogućen je gradijent od 35 MV/m, dok je svjetski rekord poznat kao Cornellov rezultat od 46 MV/m ostvaren potkraj 2004. (objavljen 2005.). U laboratoriju za fiziku elementarnih čestica Sveučilišta Cornell (Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA) ostvaren je najveći gradijent ubrzanja od 46 MV/m u supravodičkom niobijevu *RF*-rezonatoru, na temperaturi od 1,9 K [10].

Korijeni spomenutih dostignuća u razvoju suvremene akceleratorne tehnologije su u Teslinom transformatoru i naponima visokih frekvencija koji se njime dobivaju. Spomenimo još da se prva radionica o radiofrekvencijskim tehnologijama u supravodičkim linearnim ubrzičavima s Teslinim imenom (The 1st TESLA Workshop) održala na Sveučilištu Cornell 1990. godine [11].

3.2 Moderna analiza Tesline unipol-antene za prijenos energije ili poruke na daljinu

U naše doba Tesla je jedan od najzastupljenijih znanstvenika na internetu, gdje se na raznim web adresama opisuje i komentira njegov život i djelo, prije svega njegovi patenti i izumi. Zanimljivo je da su natuknice o Tesli ili članci potaknuti njegovim istraživanjima često napisani na francuskom jeziku, uz uobičajene na engleskom jeziku. Od brojnih web adresa vrijednom i znanstveno aktualnom čini nam se ova: <http://www.teslascience.org>. Učestali su, napose, web priloge o Teslinom pristupu i njegovoj ideji tehničkog ostvarenja svjetskog bežičnog sustava (prijenos energije ili poruka na daljinu). U tim znanstvenim, a često i pseudoznanstvenim osvrtima analiziraju se stvarni Teslini tornjevi-stanice s *RF*-oscilatorima i transformatorima za emisiju i bežični prijenos elektromagnetske energije, polazeći od Teslinih istraživačkih zapisa [7]) i nastavljanja tih istraživanja kroz gradnju velebnog tornja-stanice za svjetsku telegrafiju na Long Islandu 1900.-1902., što je ostao Teslin nezavršen projekt.

Teslin laboratorij i toranj na Long Islandu bili su posvećeni fundamentalnim pokusima čiji bi pozitivni rezultati potvrdili novi Teslin model širenja *RF*-valova i prijenosa energije u to doba, nasuprot standardnom Hertzovom modelu usmjerenog zračenja slobodnim prostorom. Teslina znanstveno-tehnološka motivacija bila je fundamentalno razgranata: pravi dokazi za Zemljine stacionarne valove (opažene još u istraživanjima u Colorado Springsu) koji bi mogli poslužiti za ekonomičan prijenos energije na velikoj industrijskoj skali, a

maximum energy to a particle (beam) per unit length of the cavity in which the acceleration occurs. In the superconducting linear colliders operating today at -271°C (2,15 K), the gradient acceleration typically amounts to 28 MV/m. The most recent technological development at the Jefferson laboratories in the year 2006 makes a gradient of 35 MV/m possible, while the world record known as the Cornell result of 46 MV/m was achieved in late 2004 (published in the year 2005). In the elementary particle physics laboratory at Cornell University (Ithaca, NY 14853, USA), the highest gradient acceleration of 46 MV/m in a superconducting niobium *RF* resonator at a temperature of 1,9 K has been achieved [10].

The roots of the cited achievements in the development of modern accelerator technology are in Tesla's transformer and the high frequency voltage obtained with it. We also mention the workshop on radio frequency technology in superconducting linear accelerators, named after Tesla (the 1st TESLA Workshop), held at Cornell University in the year 1990 [11].

3.2 Modern analysis of Tesla's monopole-antenna for the long-distance transmission of energy or messages

In our times, Tesla is one of the most frequently mentioned scientists on the Internet. Various websites describe and comment on his life and work, especially his patents and inventions. It is interesting that entries or articles about Tesla that emphasize his investigations are frequently written in the French language, in addition to the customary English language. Among the numerous websites, the following seems worthwhile and current to us: <http://www.teslascience.org>. There are frequent web articles on Tesla's idea for the technical realization of a world wireless system (the long-distance transmission of energy or messages). These scientific, and frequently pseudoscientific, articles contain analyses of actual Tesla towers with *RF*-oscillators and transformers for the emission and wireless transmission of electromagnetic energy, based upon Tesla's research notes [7]), including the construction of a massive tower for world telegraphy on Long Island in 1900-1902, which remained Tesla's unfinished project.

Tesla's laboratory and tower on Long Island were devoted to fundamental experiments for the purpose of attempting to confirm his new model for the propagation of *RF*-waves and the transmission of energy, unlike the standard Hertz model of directed radiation through free space. Tesla's scientific-technological areas of interest were fundamentally diverse: authentic proofs of

u sustavu Zemlja-ionosfera za transkontinentalnu (globalnu) komunikaciju; dokaz modela Zemlje kao vodiča i rezonantnog sustava s niskim svojstvenim frekvencijama (6, 18, 30 Hz, Teslini brojevi); eksperimentalna potraga za optimalnim predajnikom ($\lambda/4$ unipol antena) u sustavu antena-zemlja, glede optimalnog tehničkog omjera u elektromagnetskom prijenosu između širenja energije *EM* valovima i strujom energije koja prolazi zemljom.

Istraživanja i pokusi na Long Islandu pomoću radiotornja za bežični prijenos (wireless transmission tower) trebali su biti krunski Teslini prilozi elektromagnetskoj teoriji i tehnici, s revolucionarnim primjenama u bežičnoj komunikaciji i energetici. To je bio slavni Teslin Wardenclyffe projekt (The Tesla Wardenclyffe Project) u mjestu Wardenclyffe, danas Shoreham, Long Island, New York. Veliki znanstveni toranj visine 187 stopa (57 m), koji je u dogovoru s Teslom projektirao poznati američki arhitekt Stanford White, bio je podignut 1901. Projekt je, ipak, zamro 1905. kada je glavni podupiratelj J. P. Morgan odustao od daljnjeg financiranja.

Teorijski doprinos u ovome članku odnosi se na analizu Tesline unipol-antene, na tragu fundamentalnih Teslinih istraživanja u Colorado Springsu i na Long Islandu u kojima je ovakva antena imala ključnu ulogu u aparaturi za prijenos električne energije na daljinu (Teslin patent u 1900. godini: U.S. Patent No. 1 119 732 Apparatus for Transmitting Electrical Energy). Širenjem valova u bežičnoj telegrafiji teorijski se 1909. bavio i A. N. Sommerfeld [12], jedan od najpoznatijih njemačkih fizičara, što je Tesla smatrao velikom intelektualnom podrškom za svoje projekte, posebice u fazama kad mu je iščezavala novčana podrška. Iz razvoja elektromagnetske teorije poznato je da se bežična komunikacija može zasnivati na Zenneck-Sommerfeldovu rješenju Maxwellovih jednadžbi koje specijalno opisuju širenje valova Zemljom (njezinom površinom). Jedna od glavnih Teslinih eksperimentalnih spoznaja iz mjerenja u Colorado Springsu bila je da se kroz zemlju šire stojni valovi.

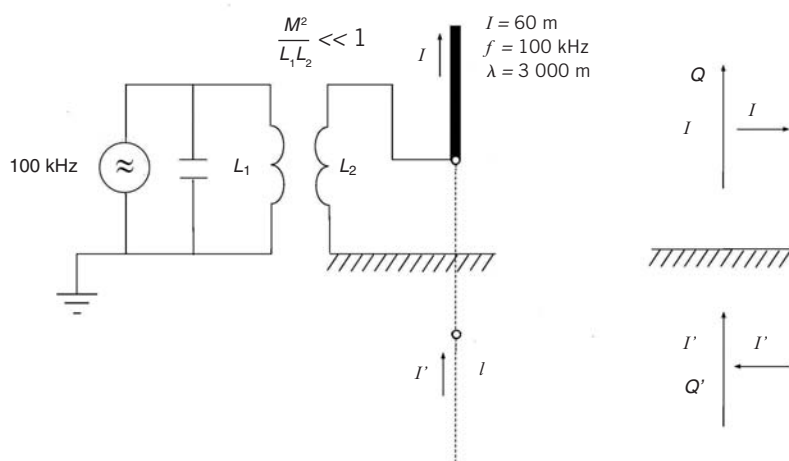
the earth's stationary waves (already noted in the research in Colorado Springs) that could serve for the economical transmission of energy on a large industrial scale, the system of the earth-ionosphere for transcontinental (global) communication; the evidence of the model of the earth as a conductor and resonant system with low characteristic frequencies (6, 18, 30 Hz, Tesla's numbers); the experimental search for the optimal transmitter ($\lambda/4$ monopole antenna) in the antenna-ground system, in view of the optimal technical ratio in electromagnetic transmission between the propagation of energy by *EM*-waves and the energy current that travels the earth.

The research and experiments on Long Island using the wireless transmission tower were supposed to be Tesla's crowning contributions to electromagnetic theory and technology, with revolutionary applications in wireless communication and energetics. This was the famous Tesla Wardenclyffe Project in the locality of Wardenclyffe, now Shoreham, Long Island, New York. The huge scientific tower of 187 feet (57 m), designed according to Tesla's specifications by the famous American architect Stanford White, was erected in the year 1901. The project was terminated, however, in 1905 when its main backer, J. P. Morgan, refused to finance it further.

The theoretical contribution in this article concerns analysis of Tesla's monopole-antenna, based upon Tesla's fundamental research in Colorado Springs and Long Island in which such an antenna had a crucial role in the equipment for the long-distance transmission of electrical energy (Tesla's U.S. Patent No. 1 119 732, Apparatus for Transmitting Electrical Energy, dated 1901). A. N. Sommerfeld, one of the most famous German physicists, was also engaged in the theoretical propagation of waves in wireless telegraphy during 1909 [12], which Tesla considered to be great intellectual support for his projects, especially during the phases when financial support dried up. From electromagnetic theory, it is known that wireless communication can be based upon the Zenneck-Sommerfeld solution to Maxwell's equations that particularly describe the propagation of waves by the earth's surface. One of Tesla's chief experimental discoveries from the measurements at Colorado Springs was that stationary waves are propagated through the earth.

Slika 3

Teslin sklop za sustav antena-zemlja, namijenjen eksperimentalnom istraživanju Teslinog modela bežičnog prijenosa elektromagnetske snage ili poruke
Figure 3
Tesla's device for the antenna-ground system, intended for the experimental investigation of Tesla's model of the wireless transmission of electromagnetic power or messages



U nastavku članka provest će se izvorni izračun jakosti valova (*RF*-polje) i protok snage na velikim udaljenostima od antene, za karakterističan tip Teslinog *RF*-predajnika za sustav antena - zemlja. Znanstveni motiv je dokazivanje ili opovrgavanje fundamentalnih Teslinih zamisli u elektromagnetskoj teoriji i primjeni na *RF*-frekvencijama.

Unipol-antena ili monopol-antena jest jedan pol (polovica) poluvalne antene čija se tehnička upotrebljivost zasniva na pojavi da tlo dobro vodi struje nižih frekvencija (od 10 kHz pa do otprilike 30 MHz). Analizirat će se unipol čija je polarizacija linearna (polarizacija električnog polja vala koji unipol zrači), dok se s obzirom na zemlju antena postavlja vertikalno. Naboj (struja) raspodijeljen po anteni ima svoju pridruženu sliku, čiji iznos i predznak ovise o odnosu dielektričnih konstanti. Neka je u sredstvu ϵ_1 naboj Q_1 , koji se u sredstvu ϵ_2 odslikava kao Q_2 . Odslikani naboji su Q_2 i Q'_1 , već prema tome gleda li se u jednom ili drugom sredstvu. Naboji iznose: $Q_2 = [(\epsilon_1 - \epsilon_2) / (\epsilon_1 + \epsilon_2)] \cdot Q_1$ i $Q'_1 = [2\epsilon_2 / (\epsilon_1 + \epsilon_2)] \cdot Q_1$. Pri vertikalnoj polarizaciji odslikana struja ima takav iznos i smjer da potpomaže zračenje koje realni unipol zrači (slika 3). Za horizontalnu polarizaciju to nije slučaj: struja i njezina slika međusobno se kompenziraju. Zato se vertikalna polarizacija i primjenjuje jer je tada u gornjem poluprostoru polje unipola po jakosti isto kao i kod dipola.

Ova analiza i proračun baš su tomu i upravljani: da se to detaljno izračuna i matematički pokaže, osobito na velikim udaljenostima od unipola (izvora) što zrači.

Ovakvi proračuni pretpostavljaju zadovoljenje određenih uvjeta. Prvi je da je tlo idealno ili barem u tolikoj mjeri idealno vodljivo da se cjelokupni

In the next section of the article, original calculations will be performed of the wave intensity (*RF*-field) and power flux at significant distances from the antenna for a characteristic type of Tesla's *RF*-transmitter for the antenna-ground system. The scientific motive is to confirm or refute Tesla's fundamental ideas in electromagnetic theory and applications at *RF*-frequencies.

A monopole antenna is a single pole (half) half-wave antenna, the technical usefulness of which is based upon the phenomenon that the soil is a good conductor of low frequency currents (from 10 kHz to approximately 30 MHz). A monopole will be analyzed with a linear polarization (polarization of the electrical wave field radiated from the monopole), while the antenna is erected vertically to the ground. The charge (current) distributed across the antenna has its own associated image, the amount and sign of which depend upon the ratio of the dielectric constants. Let Q_1 be the charge in the medium ϵ_1 , which in the medium ϵ_2 is reflected as Q_2 . The reflected charges are Q_2 and Q'_1 , according to whether they are viewed in one or the other medium. The charges are as follows: $Q_2 = [(\epsilon_1 - \epsilon_2) / (\epsilon_1 + \epsilon_2)] \cdot Q_1$ i $Q'_1 = [2\epsilon_2 / (\epsilon_1 + \epsilon_2)] \cdot Q_1$. At vertical polarization, the imaged current has a value and direction that supports the radiation emitted by the real monopole (Figure 3). This is not the case for horizontal polarization: the current and its associated image compensate mutually. Therefore, vertical polarization is used because in the upper half of the space, the field of the monopole has the same intensity as in the case of a dipole.

The purpose of such analysis is to provide detailed calculation and a mathematical demonstration, particularly at great distances from the radiating monopole (source).

Such calculations assume that certain prerequisites have been met. The first is that the soil is ideally

naboj induciran u tlu od antenskog naboja, koji se matematički može opisati, pojavljuje kao plošni naboj na granici tla i slobodnog prostora. Pretpostavljajući da je takav naboj iznosom jednak antenskom (za idealnu vodljivost i za dielektričnu konstantu tla mnogo veću od one slobodnog prostora - to je ispunjeno) te ako se iz teorije elektrostatske slike zna da odslikani naboj ne ovisi o koordinati, već o prije spomenutom odnosu dielektričnih konstanti, može se raspodjela odslikanog naboja prikazati istom funkcijom kao i raspodjela struje na samome unipolu.

Za samu analizu, neka je zadan karakterističan Teslin sklop prikazan na slici 3. Oscilator radi na frekvenciji 100 kHz. Teslin transformator ima slabu spregu, a u sklopu ima ulogu prilagođenja. Unipol-antena ima kapacitivnu reaktanciju koju treba poništiti induktivnom, što se postiže serijski dodanom zavojnicom (transformator): prijenos snage na antenu u tome je slučaju najveći. Antena je duga 60 m, štapna je i unipolna. Praktični kriterij unipolnosti koji polazi od raspodjele struje na anteni određuje unipolom antenu čija je dužina manja od $\lambda/8$. U ovom slučaju to je ispunjeno: $l < \lambda/8$, ($60 < 375$). Da bi se moglo proračunati elektromagnetsko polje unipola te snaga koju unipol zrači, treba početi od izraza za polje elementarnog električnog dipola. Dipol u mirovanju ima stalan dipolni moment i u okolici stvara samo električno polje (elektrostatički slučaj). Oscilirajući dipol, gdje se naboj giba, stvara elektromagnetsko polje: gibanje naboja je predočeno dipolnim momentom koji je vremenski ovisan, primjerice: $p = p_0 \sin \omega t$ ili $p = p_0 \cos \omega t$, odnosno u kompleksnome zapisu $p = p_0 e^{i\omega t}$.

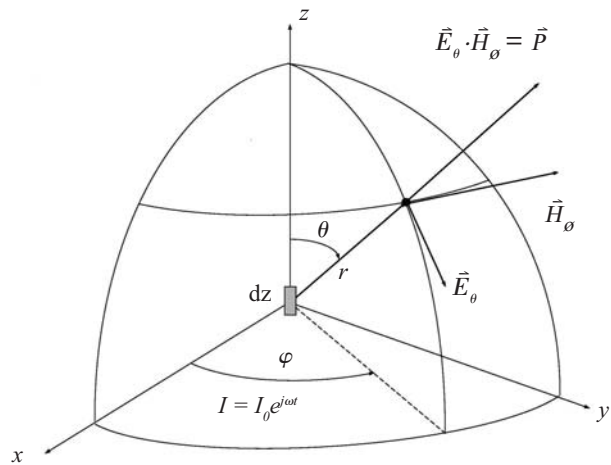
Takav harmonički dipol predstavlja elektron u atomu, ili elementarna antena duljine dz s konstantnom strujom u svakoj svojoj točki i gdje u svakoj točki takve antene struja ima vremensku promjenu $e^{i\omega t}$. Dakle, antenom teče (oscilira) struja $I = I_0 e^{i\omega t}$. Takav dipol (antena) rješava se pomoću magnetskog vektor-potencijala u smjeru z-osi s faktorom retardacije, što uračunava fizikalnu činjenicu da strujanjem naboja u anteni nastaje polje koje se potom rasprostire konačnom brzinom. Proračun polja za ovaj slučaj može se pronaći u svakoj boljoj knjizi iz teorijske fizike, odnosno elektrotehnike. Uzimaju se, stoga, samo rezultati: postoje samo radijalna komponenta električnog polja (E_r) i tangencijalna (E_θ) te azimutalna komponenta magnetskog polja (H_ϕ). Elementarna antena s komponentama polja što ih zrači prikazana je na slici 4.

conductive or at least somewhat ideally conductive, that the entire induced charge in the soil from the antenna charge, which can be mathematically described, appears as a surface charge at the interface between the soil and free space. It is assumed that such a charge is equal to that of the antenna (for ideal conductivity and for the dielectric constant of the soil that is far greater than that of the free space, these conditions are met), and if it is known from the electrostatic image theory that the imaged charge does not depend on the coordinates, but rather upon the previously mentioned ratio of the dielectric constants, it is possible to present the distribution of the imaged charge using the same function as for the distribution of the current on the monopole.

For the purpose of analysis, let us use Tesla's characteristic device, as shown in Figure 3. The oscillator operates at a frequency of 100 kHz. Tesla's transformer has a weak coupling, and is used for adjusting the device. The monopole antenna has capacitive reactance that must be cancelled by inductive reactance, which is achieved via an additional serial coil (transformer), in which case the transmission of power to the antenna is the greatest. The antenna is 60 m in length, rod-like and monopolar. The practical criteria of monopolarity according to the distribution of current on the antenna determine that the antenna is monopole and less than $\lambda/8$ in length. In this case, the criteria are met: $l < \lambda/8$, ($60 < 375$). In order to calculate the electromagnetic field of the monopole, and the power that the monopole radiates, it is necessary to begin from the expression for the field of an elementary electrical dipole. A dipole at rest has a constant dipolar moment, and creates only an electrical field (electrostatic case) in its surroundings. An oscillating dipole, where the charge moves, creates an electromagnetic field: the charge motion is expressed by dipolar momentum that is time dependent, for example: $p = p_0 \sin \omega t$ or $p = p_0 \cos \omega t$, or $p = p_0 e^{i\omega t}$.

Such a harmonic dipole represents an electron in an atom, or an elementary antenna that is dz in length with constant current in each of its points and where in each point of such an antenna the current has a temporal change of $e^{i\omega t}$. Therefore, the (oscillating) current flows through the antenna, $I = I_0 e^{i\omega t}$. Such a dipole (antenna) is solved using a magnetic vector potential in the direction of z-axis with a retardation factor, which takes into account the physical fact that through the charge flow in the antenna a field is created that is subsequently propagated by the final speed. The calculation of the field for this case can be found in every better book on theoretical physics or electrical engineering. The only results taken into account: the radial component of the electrical field (E_r), tangential (E_θ), and the azimuth component of the magnetic field (H_ϕ) exist. An elementary antenna with the radiated field components is shown in Figure 4.

Slika 4
Komponente električnog (\vec{E}) i magnetskog (\vec{H}) polja iz elementarne antene dz
Figure 4
Components of the electrical (\vec{E}) and magnetic (\vec{H}) fields from the elementary antenna dz



Tok snage predočen je Poyntingovim vektorom \vec{P} .

The power flow is presented according to the Poynting vector \vec{P} .

Odgovarajući izrazi su:

The corresponding expressions are as follows:

$$E_\theta = \frac{P''}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot \sin\theta \cdot e^{j(\omega t - kr)}$$

$$H_\phi = \frac{P''}{4\pi r c} \cdot \sin\theta \cdot e^{j(\omega t - kr)}$$

ili

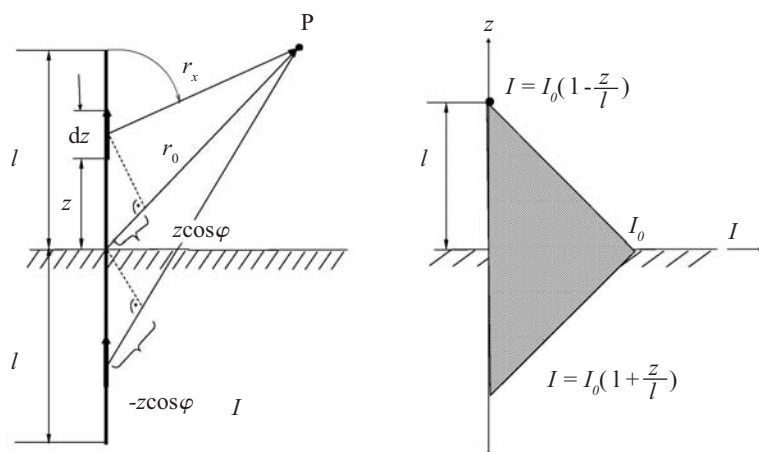
or (1)

$$E_\theta = \frac{jZ_0 I dz}{2\lambda r} \cdot \sin\theta \cdot e^{j(\omega t - kr)}$$

$$H_\phi = \frac{jI dz}{2\lambda r} \cdot \sin\theta \cdot e^{j(\omega t - kr)}$$

Vektorski produkt od \vec{E} i \vec{H} daje protok energije kroz jedinicu površine (Poyntingov vektor). Iz slike 4 se vidi da \vec{E}_θ i \vec{H}_ϕ daju Poyntingov vektor koji je tangencijalan (kruženje energije oko dipola), dok \vec{E}_θ i \vec{H}_ϕ daju radijalnu komponentu Poyntingova vektora koja predstavlja isijavanje energije u prostor. Izrazi za električno i magnetsko polje daleko od dipola, prema relaciji (1), ukazuju na ovisnost polja o raspodjeli struje ($I dz$ u brojniku). Problem raspodjele struje na anteni rješava se uzimajući u obzir rubne uvjete prijelaza vodič-vakuum na cijeloj anteni. Poznato je iz teorije antena da je raspodjela struje na poluvalnoj anteni (cilindrična poluvalna antena duljine l i polumjera presjeka a) sinusna. Za unipol, koji je mnogo kraći od poluvalne antene, u dobroj aproksimaciji možemo primijeniti trokutnu raspodjelu struje. Uz to, unipol koji je na kraju neopterećen, raspodjela struje na krajevima unipola jest nula. Vidimo da u slučaju unipola, od njegove virtualne poluvalne antene dolazi u obzir tek onaj dio koji duljinom odgovara unipolu. Uzimajući u obzir pojavu električne slike u sustavu antena-zemlja i prije navedene pretpostavke, raspodjela struje na unipolu izgleda kao na slici 5.

The vector product from \vec{E} and \vec{H} yields a flow of energy through a surface unit (Poynting vector). It is seen from Figure 4 that \vec{E}_θ and \vec{H}_ϕ yield a Poynting vector that is tangential (rotating energy around the dipole), while \vec{E}_θ and \vec{H}_ϕ yield a radial component of the Poynting vector that represents the radiation of energy in a space. The expressions for the electrical and magnetic fields at a distance from the dipole, according to expression (1), show the dependence of the field upon current distribution ($I dz$ in the numerator). The problem of current distribution on the antenna is solved by taking into account the marginal conditions of the conductor-vacuum transition on the entire antenna. It is known from antenna theory that current distribution on a half-wave antenna (cylindrical half-wave antenna length l and the cross-section radius a) is sinusoidal. For a monopole, that is much shorter than a half-wave antenna, with a good approximation we can apply a triangular distribution of current. Moreover, for a monopole without a load at the end, the distribution of current at the ends of the monopole is zero. We see that in the case of the monopole, from its virtual half-wave antenna only the part that is of a length corresponding to that of the monopole can be considered. Taking into account the phenomenon of the electrical image in the antenna-ground system and the aforementioned prerequisites, current distribution on the monopole is shown in Figure 5.



Slika 5
Aproksimacija trokutnom raspodelom struje u Teslinoj unipol-anteni
Figure 5
Approximation of the triangular current distribution in Tesla's monopole antenna

Izračunajmo polje E_θ u točki P, udaljenoj za r_0 od unipola.

Let us calculate field E_θ at point P, at a distance r_0 from the monopole.

U elementu dz neka je naboj Q koji struji brzinom v . Jakost struje tada iznosi:

In element dz , let charge Q flow at the speed of v . The current strength is then as follows:

$$i = Q \frac{v}{dz}, \quad Qv = p' = i dz, \quad v = \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

Struju kroz unipol opisujemo funkcijom $i = f(z) \cdot \cos(\omega t)$, što uračunavanjem retardacije daje:

We describe the current through the monopole with the function $i = f(z) \cdot \cos(\omega t)$, which, taking retardation into consideration, yields:

$$i = f(z) \cdot \cos(\omega t - kr_x)$$

Nadalje, imamo p' i p'' :

Furthermore, we have p' and p'' :

$$p' = i dz = f(z) \cdot e^{j(\omega t - kr_x)} \quad i \quad p'' = j\omega p' \quad (3)$$

Iz relacija u (1) imamo izraz za E_θ , zanemarivši vremensku zavisnost $e^{j\omega t}$ jer smo je već uzeli u retardaciji struje. Element dz u točki r_x ima polje:

From the relation in (1) we have an expression for E_θ , ignoring temporal dependence $e^{j\omega t}$ because we have already taken it in current retardation. Element dz point r_x has the following field:

$$dE_\theta = \frac{p''}{4\pi\epsilon r_x^2} \cdot \sin\theta \cdot e^{j(\omega t - kr_x)} \cdot e^{-jkr_x} \quad (4)$$

Iz slike 5 se vidi da je za daleku točku r_x približno jednako r_0 , ali se fazna razlika mora uzeti u obzir, što daje:

From Figure 5, it is evident that for the distant point, r_x is nearly equal to r_0 , but the phase difference must be taken into account, which yields:

$$r_x = r_0 - z \cos\theta$$

Polje u dalekoj točki P je suma elementarnih polja s uračunatom faznom razlikom između njih:

The field in distant point P is the sum of the elementary fields with a calculated phase difference among them:

$$E_{\theta} = \frac{j\omega \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 c^2} \cdot e^{j(\omega t - kr_0)} \int_{-l}^{+l} e^{-jkr_0} \cdot e^{jkz \cos \theta} f(z) dz \quad (5)$$

Ako je $l \ll \lambda$, onda je $kz = (2\pi/\lambda)z$ vrlo mala veličina, što uz izostavljanje e^{jkz} , jer je već uračunat u retardaciji, daje:

If $l \ll \lambda$, then $kz = (2\pi/\lambda)z$ is very small, which with the omission of e^{jkz} because it has previously been calculated in retardation, yields:

$$E_{\theta} = \frac{j\omega \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 c^2} \cdot e^{j(\omega t - kr_0)} \int_{-l}^{+l} f(z) dz \quad (6)$$

Budući da je:

Since:

$$\int_{-l}^{+l} f(z) dz = I_0 l \quad (7)$$

dobivamo E_{θ} da u nekoj dalekoj točki za r udaljenoj od unipola iznosi:

we obtain that E_{θ} at a distant point, r , from the monopole is

$$E_{\theta} = \frac{j\omega \sin \theta}{4\pi \epsilon_0 c^2} e^{j(\omega t - kr)} I_0 l \quad (8)$$

Za prosječan tok snage kroz jedinicu površine u jedinici vremena potreban je kvadrat polja. Dakle, E_{θ} iz relacije (8) množimo s njegovom konjugirano-kompleksnom vrijednošću:

For the average flux power per square unit per time, the square of the field is needed. Therefore, E_{θ} from expression (8) is multiplied by its conjugated-complex value:

$$E_{\theta}^2 = E_{\theta} E_{\theta}^* = \frac{\omega^2 \sin^2 \theta}{16\pi^2 \epsilon^2 c^4 r^2} I_0^2 l^2 \quad (9)$$

Pitanje je, međutim, je li ovakvo računanje primjenom aproksimacija pravi put u analizi unipol-antene? Sigurno jest da ono ne daje uvid u veličine pogrešaka koje se njime čine!

It is a question, however, whether such calculation through applied approximations is the appropriate path for monopole-antenna analysis. It certainly does not provide insight into the magnitude of the errors that are thereby incurred!

Stoga se obavlja detaljna analiza polazeći od same fizikalne situacije, pa se onda napravi aproksimacija, ako je moguća. Polje E_{θ} jest suma dvaju integrala koji u integrandu imaju suprotna fazna zaostajanja ($e^{jkz \cos \theta}$ i $e^{-jkz \cos \theta}$, vidi sliku 5):

Therefore, detailed analysis is performed, starting from the physical situation, followed by approximation to the extent possible. Field E_{θ} is the sum of two integrals which have opposite phase lags in the integrand ($e^{jkz \cos \theta}$ and $e^{-jkz \cos \theta}$, see Figure 5):

$$E_{\theta} = I_0 \alpha \sin \theta \left\{ \int_0^l \left(1 - \frac{z}{l}\right) e^{jkz \cos \theta} dz + \int_0^l \left(1 - \frac{z}{l}\right) e^{-jkz \cos \theta} dz \right\} \quad (10)$$

Konstanta α uključuje valni otpor zraka i neke druge veličine te vremensku ovisnost u retardiranoj formi (uzimanjem kvadrata ona pridonosi jedinicom). Vrijednost prvog integrala u zagradi u relaciji (10) jest E_1 , a drugog E_2 :

Constant α includes free-space wave impedance, some other values and the time retardation term (taking a second power yields unity). The value of the first integral in parentheses in expression (10) is E_1 , and the second is E_2 :

$$E_1 = \frac{-j}{k \cos \theta} - \frac{(e^{jkl \cos \theta} - 1)}{lk^2 \cos^2 \theta}, \quad E_2 = \frac{j}{k \cos \theta} - \frac{(e^{-jkl \cos \theta} - 1)}{lk^2 \cos^2 \theta} \quad (11)$$

E_θ jest suma od E_1 i E_2 :

E_θ is the sum of E_1 and E_2 :

$$E_\theta = \frac{2I_0 \alpha \sin \theta}{lk^2 \cos^2 \theta} \{1 - \cos(kl \cos \theta)\} \quad (12)$$

Budući da se u računanju zračenja u cijeli prostor (u 4π) prosječno zračenje po jedinici površine u jedinici vremena množi s diferencijalnim elementom površine zamišljene kugle, poželjno je izraz (12) nadomjestiti odgovarajućom aproksimacijom. Unipol isijava u gornji poluprostor, pa karakteristične točke iznose $\theta = 0$ i $\pi/2$. Član $[1 - \cos(kl \cos \theta)]$ iz izraza (12), razvijanjem u red za $\theta = 0$, postaje:

Since in the calculation of radiation to the full space (in 4π) the average radiation per square unit per time is multiplied by the differential surface element of the imaginary sphere, it is desirable to replace expression (12) with the corresponding approximation. The monopole radiates in the upper half of the space, so the characteristic points are $\theta = 0$ i $\pi/2$. Term $[1 - \cos(kl \cos \theta)]$ from expression (12), expressed in terms of $\theta = 0$, becomes:

$$1 - \cos(kl \cos \theta) = 1 - 1 + \frac{(kl)^2}{2} - \frac{(kl)^4}{4!} + \frac{(kl)^6}{6!} - \dots \quad (13)$$

Aproksimaciju sada možemo učiniti tako da zanemarimo sve članove počevši od člana s četvrtim faktorijelom koji je za $kl = 0,125$ vrlo mali. Dakle, cijeli ovaj član može se nadomjestiti s $(kl)^2/2$. Za $\theta = \pi/2$ ovaj član daje nulu. Drugi karakteristični član za $\theta = \pi/2$ predstavlja neodređeni oblik 0/0. Dvostrukom primjenom L'Hospital-Bernoullijevog pravila član postaje:

We may now make an approximation by ignoring all the terms starting with those of the fourth order, which is very low for $kl = 0,125$. Therefore, this entire term can be replaced with $(kl)^2/2$. For $\theta = \pi/2$, this term yields zero. Another characteristic term for $\theta = \pi/2$ represents the indeterminate form 0/0. Through the two-fold application of the L'Hospital-Bernoulli Rule, the term becomes:

$$\frac{1 - \cos(kl \cos \theta)}{\cos^2 \theta} = \lim_{\theta \rightarrow \pi/2} \left[\frac{\cos(kl \cos \theta) \cdot (-\sin \theta) \cdot \frac{(kl)^2}{2}}{-\sin \theta} \right] = \frac{(kl)^2}{2} \quad (14)$$

Dakle, polje E_θ u dalekoj točki od unipola, uz opasku da smo ga prije svega izveli pomoću izraza za računanje cjelokupne emisije, ima vrijednost:

Therefore, field E_θ at a distant point from the monopole, which we have obtained, using the expression for the calculation of the total emission, has the following value:

$$E_\theta = \frac{2I_0 \alpha \sin \theta}{lk^2} \cdot \frac{(kl)^2}{2} = I_0 \alpha \sin \theta \quad \alpha = \frac{jZ_0}{2\lambda r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (15)$$

Ukupna emisija unipola u gornji poluprostor iznosi:

The total emission of the monopole in the upper half space is as follows:

$$P_{\text{uk}} = \int_0^{\pi/2} P_{\text{pr}} r^2 2\pi \sin\theta d\theta \quad P_{\text{pr}} = \frac{E_\theta^2}{2Z_0} \quad E_0^2 = E_\theta E_\theta^* \quad (16)$$

Integriranjem, ukupna emisija jest:

Through integration, the total emission is:

$$P_{\text{uk}} = \frac{Z_0 L^2 I_0^2 \cdot \pi}{6\lambda^2} \quad (17)$$

S druge strane, ako ukupno zračenje izrazimo preko otpora isijavanja i efektivne vrijednosti struje napajanja unipola, dobivamo:

From the other aspect, if we express the total radiation through the emission impedance and the effective value of the supply current to the monopole, we obtain:

$$P_{\text{uk}} = I_{\text{ef}}^2 \cdot R_{\text{is}} \quad I_0^2 = 2I_{\text{ef}}^2 \quad (18)$$

Uspoređivanjem izraza (17) i (18) dobivamo da je otpor isijavanja asimetrično napajanog unipola jednak polovici otpora isijavanja dipola (uvjetno: poluvalne antene):

By comparing expressions (17) and (18), we obtain that the radiation resistance of the asymmetrically supplied monopole is equal to half the resistance value of the dipole (conditionally: half-wave antenna):

$$R_{\text{is}} = \frac{Z_0 \pi}{3} \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2, \quad (19)$$

Z_0 je valni otpor slobodnog prostora (impedancija).

Z_0 is the wave resistance of the free space (impedance).

Ovo je pravi dokaz da je proračun valjan i da su primijenjene aproksimacije također valjane, kao i fizikalna slika od koje se krenulo. Moglo se i prije proračuna pretpostaviti da unipol zrači polovicu snage ekvivalentne poluvalne antene, uz istu struju napajanja. Prema tomu i otpor isijavanja unipola treba biti polovica otpora poluvalentne antene ili dipola (poluvalna antena je identična dipolu ako ima konstantnu raspodjelu struje jer su izrazi za polje dipola izvedeni za konstantnu raspodjelu). Ovi su, pak, rezultati dobiveni polazeći izravno od samog unipola i proračunom njegovog polja i snage, što verificira izračun kao takav, a napose fizikalnu sliku i čitavu analizu koja je primijenjena.

This is genuine proof that the calculation is valid and that the applied approximations are also valid, as is the physical image we started from. Prior to the calculation, it could have been assumed that the monopole radiates half the power of an equivalent half-wave antenna, with the same supply current. Accordingly, the radiation resistance of the monopole should be half the resistance of the half-wave antenna or dipole (a half-wave antenna is identical to a dipole if it has constant current distribution, because the expressions for the dipole field are calculated for constant distribution). These results were, nonetheless, obtained by starting directly from the monopole itself and calculating its field and power, which are verified by the calculation as such, particularly the physical image and entire analysis applied.

Čitav proračun izveden je za idealni unipol: unipol čija je duljina mnogo veća od polumjera presjeka, tako da je utjecaj otpora gubitka u tom slučaju zanemariv. Osim toga, tlo nikada nije idealno vodljivo, stoga su i gubici zbog toga jako veliki. Veliki gubici su i u antenskoj zavojnici. Stanovito poboljšanje postiže se ukapanjem metalnih traka

The entire calculation was performed for an ideal monopole: a monopole with a length far longer than that of the radius of the cross section, so that the influence of resistance loss is negligible in this case. Moreover, soil is never ideally conductive and, therefore, the consequent losses are very great.

u tlu ispod unipola ili se sam unipol modificira. Unipol se, naime, savije na vrhu u obliku slova L ili T, ili se na vrhu optereti kuglom. Kugla prima određeni iznos naboja i tako površinu raspodjele struje čini većom. Istu ulogu ima L ili T završetak unipola. Time je emisija snažnija za takve realno modificirane unipole. Odnos realnog i idealnog unipola može se, dakako, ustanoviti usporedbom izmjerenih i računom dobivenih podataka.

Primjer: Pokazuje se red veličine parametara kad unipol zrači. Izračuna se struja potrebna za zračenje od 200 kW i električno polje unipola na udaljenosti 30 km od unipola.

Za zračenje snage od 200 kW u gornji poluprostor, za unipol na slici 3, potrebna efektivna vrijednost struje napajanja unipola iznosi $1,126 \cdot 10^3 \text{ A}$. Jakost električnog polja elektromagnetskog vala na udaljenosti 30 km od unipola na tlu prema relaciji (15) ili (8) iznosi:

$$E_{\theta} = j0,1415 e^{j62,8(10^4 t - 1)} \text{ V/m,}$$

Iz električnog se polja može izračunati magnetsko ($E_{\theta}/H_{\phi} = Z_0$, ili iz Maxwellovih jednačbi za slobodni prostor pomoću kojih se dobiva $H = E / \mu_0 c$). Za naš primjer H iznosi:

$$H_{\phi} = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ A/m.}$$

Poyntingov vektor, 30 km od unipola, na tlu iznosi:

$$P = P_{\text{pr}} = \frac{E_{\theta}^2}{2Z_0} = 2,656 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

Tesla je zamišljao da njegov model prijenosa sustavom antena-zemlja može omogućiti gotovo 90 posto prijenosa energije površinom Zemlje, a preostalih 10 % elektromagnetskim Hertzovim valovima kroz atmosferu. On je nastojao konstruirati snažni predajnik za takav prijenos i pouzdano eksperimentalno utvrditi valne duljine, radi određivanja fenomenoloških zakona rasprostiranja kroz zemlju i zrak. Teslina antena (predajnik, toranj) trebala je imati slabo prilagođenje impedancije na slobodni prostor, da bi se potisnulo širenje energije valovima. U

There are also great losses in the antenna coil. Some improvement is achieved by burying a metal strip in the soil under the monopole or by modifying the monopole itself. The monopole is bent at the tip in the form of the letter L or T, or has a sphere at the tip. The sphere receives a certain amount of charge and thereby increases the current distribution surface. The L or T tip of the monopole performs the same role. Thereby, emission for such real modified monopoles is intensified. The ratio between the real and ideal monopole can be established through a comparison of the measured and calculated data obtained.

Example: The order of the value of the parameters when the monopole radiates is presented. The current necessary for 200 kW radiation and the electric field of the monopole at a distance of 30 km from the monopole are calculated.

For 200 kW of radiation in the upper half space of the monopole in Figure 3, the necessary effective value of the supply current is $1,126 \cdot 10^3 \text{ A}$. The intensity of the electric field of the electromagnetic wave at a distance of 30 km from the monopole on the ground according to expression (15) or (8) is as follows:

The magnetic field can be calculated from the electric field ($E_{\theta}/H_{\phi} = Z_0$, or from Maxwell's equation for free space, according to which $H = E / \mu_0 c$ is obtained). For our example, H is:

The Poynting vector, 30 km from the monopole, on the ground is:

Tesla believed that his transmission model using the antenna-ground system could transmit nearly 90 % of the energy via the earth's surface and the remaining 10 % via electromagnetic Hertz waves through the atmosphere. He attempted to construct a powerful transmitter for such transmission and determine wavelengths reliably through experiments, with the goal of defining the phenomenological laws of propagation through the earth and air. Tesla's antenna (transmitter, tower) was supposed to have weak impedance matching for the free space, in order to decrease energy

Hertzovu modu prijenosa cilj je imati što bolje prilagođene antene onoj slobodnog prostora (377Ω).

Bežično širenje valova kroz zrak-zemlju, kao dva sredstva, računali su Arnold Sommerfeld i Jonathan Zenneck. Uz Zenneckove i/ili Sommerfeldove površinske valove bilo je kasnije mnogo korisnih rješenja na toj crti istraživanja. Tesla je takva rješenja smatrao najvećom podrškom svome modelu. Analitički izračuni Teslinog sklopa za sustav antena-zemlja, koji su izvedeni u ovome članku s primjerom na kraju, pokazuju da je polje malo, a snaga zaista slaba na velikim udaljenostima od unipola. Prijenos kroz površinu Zemlje (Teslin mod) čini se prirodnim i tehnički opravdanim, što dokazuje ovaj proračun. Nažalost, ostao je to samo san jer Tesla nije dovršio istraživanja i ponudio svoja tehnička rješenja, premda su mu ideje bile znanstveno utemeljene.

4 IZUMI I DOPRINOSI NIKOLE TESLE U NASTAVI FIZIKE I ELEKTROTEHNIKE NA SVEUČILIŠTU U ZAGREBU

Percepcija Teslinih izuma u fizici i elektrotehnici u hrvatskoj znanosti i kulturi bila je vrlo efikasna. Nisu posrijedi bile samo simpatije prema istraživaču iz našeg kraja nego stvaralačka zainteresiranost hrvatskih sveučilišnih nastavnika fizike i elektrotehnike za ugradnjom Teslinih spoznaja u nastavne programe. Takav odnos prema Tesli dokazuju i najveće počasti koje je primio u hrvatskom znanstveno-kulturnom krugu. Nikoli Tesli dodijeljen je počasni doktorat (doctor honoris causa) 29. lipnja 1926. na Elektrotehničkom odsjeku Tehničkog fakulteta na Sveučilištu Kraljevine SHS u Zagrebu koja mu je bila uručena u New Yorku. Zanimljiva je formulacija u odluci da Tesla počasni doktorat tehničkih znanosti prima u povodu 70. obljetnice rođenja, ali kao prvi počasni doktor prirodnoznanstvenik na Sveučilištu. Nikola Tesla izabran je za počasnog člana JAZU (današnjeg HAZU) već 1896. godine. Zastupljenost Teslinih znanstvenih dostignuća u nastavi fizike i elektrotehnike na Sveučilištu u Zagrebu obradit će se selektivno na primjerima trojice uglednih hrvatskih znanstvenika: Ivana Supeka, Vatroslava Lopašića i Tome Bosanca. Dakako da ima i ostalih koji su se ozbiljno bavili Teslom i njegovim djelom. Međutim, presuđuju ovdje dva razloga: glede Ivana Supeka, autor je bio recenzent dopunjenog izdanja njegove Povijesti fizike [13], a glede Vatroslava Lopašića, jedan od nastavljača na katedri fizike na FER-u, odnosno prije zvanom Elektrotehničkom fakultetu, gdje je

propagation by the waves. In Hertz's transmission mode, the goal was to have the optimal matching of the antenna to the free space (377Ω).

The wireless propagation of waves via air-ground, as two media, was calculated by Arnold Sommerfeld and Jonathan Zenneck. In addition to Zenneck's and/or Sommerfeld's surface waves, there were many useful solutions later along this line of research. Tesla felt that such solutions provided great support for his model. The analytical calculations of Tesla's device for the antenna-ground system that are presented in this article, with an example at the end, show that the field is small and the power is quite weak at great distances from the monopole. Transmission via the earth's surface (Tesla's mode) seems naturally and technically justified, as demonstrated by these calculations. Unfortunately, such transmission has remained a mere dream because Tesla did not complete his research or provide a technical solution, although his ideas were well founded scientifically.

4 THE INCLUSION OF NIKOLA TESLA'S INVENTIONS AND CONTRIBUTIONS IN THE PHYSICS AND ELECTRICAL ENGINEERING CURRICULA AT THE UNIVERSITY OF ZAGREB

There has been considerable recognition afforded to Tesla's inventions in physics and electrical engineering in Croatia. This is not merely due to an affinity toward a researcher from our homeland but the creative interest by Croatian university instructors of physics and electrical engineering to incorporate Tesla's ideas into the curricula. Such an attitude toward Tesla has also been expressed through the high honors that have been awarded by the Croatian scientific and cultural milieu. Nikola Tesla received an honorary doctorate (doctor honoris causa) on June 29, 1926, from the Department of Electrical Engineering, Faculty of Technology; University of the Kingdom of the Serbs, Croats and Slovenes, in Zagreb, which was presented to him in New York. Tesla received an honorary doctorate of technical sciences on the occasion of his 70th birthday, the first honorary doctorate of natural sciences at the university. Nikola Tesla was chosen as an honorary member of the Yugoslav Academy of Arts and Sciences (today the Croatian Academy of Arts and Sciences) in 1896. It will be selectively discussed the inclusion of Tesla's scientific achievements in physics and electrical engineering instruction at the University of Zagreb, through the examples of three distinguished Croatian scientists: Ivan Supek, Vatroslav Lopašić and Tomo Bosanac. Certainly there are also others who

on dulji niz godina bio predavačem. Tomo Bosanac je 1976. dao poticaj za proračun Tesline unipol-antene koji je izveden u ovome članku.

4.1 Zastupljenost Nikole Tesle u Supekovoj Povijesti fizike

U svojoj poznatoj knjizi Povijest fizike [13], jednoj od najpoznatijih knjiga u hrvatskoj povijesti znanosti, Ivan Supek iznosi na više mjesta jezgrovite komentare o Teslinoj ulozi i značenju njegovih izuma u razvitku elektrotehnike (strojevi i motori) i radiotehnike. U poglavlju knjige Elektrodinamika, na crti razvoja elektrotehnike i elektromagnetskih strojeva i aparata koji se zasnivaju na jakim električnim strujama, Supek uz Oersted, Gaussa, Ampèrea, Faradya i Jacobija smješta i Teslu. Nikola Tesla je bio jedan od protagonista tog razvoja. Malo dalje u istom poglavlju spominje se Teslin motor konstruiran 1886. za dobivanje jakih izmjeničnih struja, na principu elektromagnetske indukcije. Dodajmo da je Tesla ideju za takav motor imao još tri godine prije toga, dok je u Parizu radio za Edisonovu kompaniju za Europu, a tada je konstruirao i prvu verziju takvog motora. U odjeljku o elektromagnetskim valovima, njihovu stvaranju i korisnim primjenama, Supek posebno naglašava velikog izumitelja Nikolu Teslu. Tesla je, nezavisno od ruskog fizičara Aleksandra Popova, konstruirao radijsku antenu i prvi slao elektromagnetsku energiju na velike udaljenosti. On je primao valove od radiostanica udaljenih i do 1 000 km te ga po tome treba smatrati pioninom radiotehnike. Zanimljiv je i točan Supekov komentar o Teslinu karakteru i inženjerskom duhu, što je Teslu, zapravo, lišilo i Nobelove nagrade za izum bežične telegrafije. Potkraj 19. stoljeća Tesla je oklijevao u praktičnoj primjeni i upotrebi svojih izuma o prijenosu elektromagnetskih valova (*EM-valova*) na daljinu jer je bio zaokupljen rješavanjem svoga veličanstveno zamišljenog svjetskog sustava bežičnog prijenosa energije. Dotle je Guglielmo Marconi, potaknut Hertzovim pokusima iz 1887. u Karlsruheu, započeo 1894. svoje pokuse o elektromagnetskim valovima i bežičnoj telegrafiji (wireless telegraphy). Već 1895. poslao je prvi telegrafski signal kroz slobodni prostor (zrak). Marconi je 1901. poslao *EM-valove* iz Velike Britanije u SAD. Bila je to svjetska senzacija, prva transatlantska bežična komunikacija, zametak suvremene elektromagnetske komunikacije. Za takve pokuse i uređaje prikladne za komercijalnu primjenu G. Marconi je primio Nobelovu nagradu iz fizike 1909. za bežičnu telegrafiju. Marconijevi uspjesi su na neki način osujetili Teslin projekt svjetskog telegrafskog sustava na Long Islandu.

have been seriously engaged with Tesla and his work. However, the author of this article was the editor of the revised edition of Ivan Supek's Povijest fizike (History of Physics) [13] and Vatroslav Lopašić was an instructor for many years at the Physics Department of the Faculty of Electrical Engineering and Computing (formerly the Faculty of Electrical Engineering). In 1976, Tomo Bosanac provided the initiative for the calculation of Tesla's monopole antenna, which is presented in this article.

4.1 Nikola Tesla's inclusion in Supek's History of Physics

In Ivan Supek's well known Povijest fizike (History of Physics) [13], one of the best known books in the history of Croatian science, in several places the author presents succinct commentary on Tesla's role and the significance of his inventions in the development of electrical engineering (machines and motors) and radio technology. In the chapter of the book on electrodynamics, where there is an account of the development of electrical engineering, electromagnetic machinery and devices based upon high power electrical currents, in addition to Oersted, Gauss, Ampère, Faraday and Jacobi, there is also Tesla. Nikola Tesla was one of the protagonists of this development. A little further on in the chapter, there is mention of Tesla's motor, constructed in 1886 for obtaining high power alternating currents, on the principle of electromagnetic induction. We add that Tesla had the idea for such a motor three years earlier, while he was working at Edison's company for Europe in Paris, when he constructed the first version. In the section on electromagnetic waves, their generation and useful application, Supek specifically refers to Nikola Tesla as a great inventor. Tesla, independently of the Russian physicist Aleksander Popov, constructed a radio antenna and was the first to send electromagnetic energy over a long distance. He received waves from radio stations up to 1 000 km distant, and should be considered as a pioneer of radio technology. Supek provides an interesting and accurate commentary on Tesla's character and engineering spirit, which actually deprived Tesla of the Nobel Prize for the invention of the wireless telegraph. At the end of the 19th century, Tesla hesitated regarding the practical application and use of his inventions for the long-distance transmission of electromagnetic waves (*EM-waves*) because he was occupied with the solution for his magnificent concept of a world system for the wireless transmission of energy. Meanwhile, Guglielmo Marconi, inspired by H. Hertz's experiments of 1887 in Karlsruhe, began his experiments on electromagnetic waves and wireless telegraphy in 1894. In 1895, he already sent his first telegraph signal through the air. In 1901, Marconi sent *EM-waves* from Great Britain to the United States. It was a world sensation, the first transatlantic wireless communication, the beginning of modern

Koliko su Supekovi komentari o Tesli i njegovu uključivanju u povijest razvoja fizike dragocjeni, svjedoči i podatak da npr. svjetski poznati povjesničar fizike Abraham Pais, u svom kapitalnom djelu: *Inward Bound, Of matter and Forces in the Physical World* (1986) spominje Marconija, ali ne i Teslu.

4.2 Zastupljenost Nikole Tesle u Lopašićevim Predavanjima o elektromagnetskom polju i radovima Tome Bosanca

Autor ovog članka već je više puta referirao i napisao da se Vatroslav Lopašić (Pakrac, 9. prosinca 1911.-Zagreb, 17. prosinca 2003.) može smatrati klasikom nastave fizike na Elektrotehničkom i drugim tehničkim fakultetima Sveučilišta u Zagrebu.

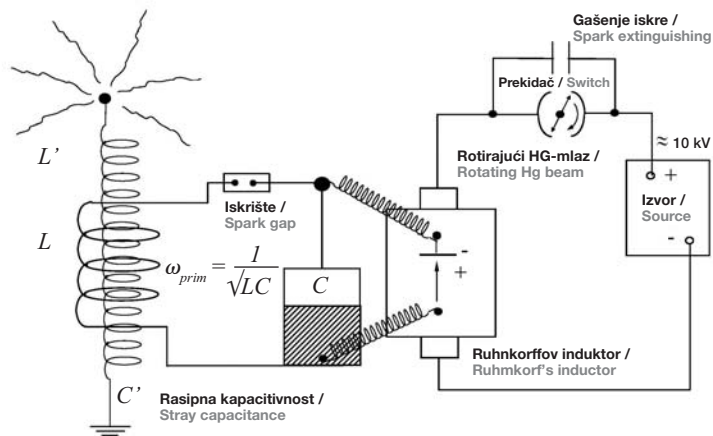
electromagnetic communication. For such experiments and devices suitable for commercial application, G. Marconi received the Nobel Prize in Physics in 1909 for wireless telegraphy. Marconi's successes in a sense were instrumental in the defeat of Tesla's project on Long Island for a world telegraphic system.

The value of Supek's commentaries and his inclusion of Tesla in the history of the development of physics becomes more apparent when one considers, for example, that Abraham Pais, the world famous historian of physics, mentions Marconi but not Tesla in his capital work entitled: *Inward Bound, Of Matter and Forces in the Physical World* (1986).

4.2 The coverage of Nikola Tesla in Lopašić's lectures on the electromagnetic field and the work of Tomo Bosanac

The author of this article has already referred several times to Vatroslav Lopašić (Pakrac, December 9, 1911 - Zagreb, December 17, 2003) whose lectures in physics at the Faculty of Electrical Engineering and other technical faculties of the University of Zagreb can be considered classics.

Slika 6
Izvedba (replika)
Tesling
transformatora
u Lopašićevim
predavanjima iz fizike
Figure 6
Replica of Tesla's
transformer in
Lopašić's physics
lectures



Uz izvorne doprinose u pristupu klasičnoj fizici i metodi nastave utemeljenoj na pokusima tijekom predavanja, posebno treba naglasiti Lopašićevu knjigu *Predavanja iz fizike: Elektromagnetsko polje* [14]. To je jedan od najboljih uvoda u elektromagnetsku teoriju na hrvatskome jeziku. Knjiga se izdvaja originalnim fenomenološkim pokusima kojima se pokazuju i izvode glavni zakoni električnog i magnetskog polja, pa i slavne Maxwellove jednadžbe. U toj su knjizi znatno zastupljeni Nikola Tesla i preslike slavni Teslinih pokusa, što ih je Lopašić zajedno sa svojim suradnicima složio i osobno izvodio. Može se reći da su za sintagmu klasik nastave fizike uvelike

In addition to original contributions in the approach to classical physics and the method of instruction based upon experiments during lectures, it is particularly important to point out Lopašić's book *Predavanja iz fizike: Elektromagnetsko polje* (Lectures on Physics: Electromagnetic Field) [14]. This is one of the best introductions to electromagnetic theory in the Croatian language. The book is distinguished by original phenomenological experiments that demonstrate the main laws of electrical and magnetic fields, and the famous Maxwell equations. In this book there is significant space devoted to Nikola Tesla and copies of Tesla's famous experiments, which

zaslužni baš pokusi s Teslinim transformatorom i Teslinim strujama, što ih je Lopašić izvodio na predavanjima.

Opisat će se replika Teslinog visokofrekvencijskog transformatora, u Lopašićevoj izvedbi [14]. Shema Teslinog *RF*-transformatora prikazana je na slici 6. Veliki induktor napaja se iz istosmjernog generatora snage od oko 10 kW. Prekidač je izvorne Tesline konstrukcije motorni, a spoj i prekid postižu se rotirajućim živinim mlazom. Induktor nabija bateriju Leydenskih boca s debelim staklom. Boce se izbijaju kroz iskrište i zavojnicu primarnog kruga od desetak zavoja. U toj zavojnici koaksijalno je smještena sekundarna, visoka i s mnogo zavoja. Donji je kraj te sekundarne zavojnice uzemljen, a gornji završava nekom elektrodom. Sekundarna zavojnica treba biti rezonantno ugođena na titranje naboja u primarnoj (princip Teslinog transformatora).

Lopašić zanimljivo opisuje električne pojave koje se dobivaju pomoću Teslinog transformatora. Kad uređaj radi, iz gornjeg kraja sekundarne zavojnice izbijaju u zrak električne iskre duge više od pola metra. U blizini Teslina transformatora fluorescentne cijevi svijetle, a da nisu spojene s transformatorom. Električna iskra iz transformatora može zapaliti drvo, a može je se primiti na metalnu elektrodu koja se drži golom rukom. Neće se osjetiti električni udar. Da bi se dobili vrlo visoki naponi, u pokusima s Teslinim transformatorom, Lopašić je rabio Ruhmkorffov induktor. Posebno zorno Lopašić opisuje princip rada induktora, da bi studenti razumjeli bit i primjenu zakona elektromagnetske indukcije.

Profesor Tomo Bosanac (Stare Plavnice kraj Bjelovara, 15. svibnja 1918. - Zagreb, 12. kolovoza 2003.), ugledni nastavnik FER-a na katedri Teorijske elektrotehnike, također ističe važnost primjene Ruhmkorffova induktora u Teslinim istraživanjima *VF*-struja [15] i [16]. Prema Bosancu, Ruhmkorffov induktor se do Tesle rabio za dobivanje visokih frekvencija, ali ga Tesla prvi upotrebljava kao pravi transformator kojemu dodaje specijalno usavršeno iskrište da bi energijski gubici u iskrištu bili najmanji. Tesla je tako dobio snažne izvore *VF*-struja od nekoliko milijuna perioda u sekundi i brojne neviđene učinke koji su ga učinili slavnim. Nikola Tesla je bio prvi eksperimentalni fizičar koji je tehnički primijenio prijenosni vod kao oscilacijski sustav na visokim frekvencijama, prije slavnih fizičara Hermanna von Helmholtza i J. J. Thomsona. Tomo Bosanac je bio jedan od glavnih pokretača svečanog obilježavanja 120. obljetnice rođenja Nikole Tesle 1976. godine u Zagrebu. U spomen tog događaja tiskan je u izdanju JAZU zbornik

Lopašić together with his associates set up and personally conducted. It can be said that the experiments with Tesla's transformer and Tesla's currents that Lopašić performed during his lectures are largely responsible for the syntagma of classical physics instruction

Lopašić's replica of Tesla's high frequency transformer will be described [14]. A diagram of Tesla's *RF* transformer is shown in Figure 6. The large coil is supplied from an approximately 10 kW DC power generator. The switch is Tesla's original construction, and switching is achieved using a rotating mercury beam. The coil charges a battery composed of Leyden jars with thick glass. The jars are discharged through the spark gap and a primary coil of approximately ten turns. A tall secondary coil with many turns is placed coaxially in the primary coil. The bottom end of the secondary coil is grounded and the top is connected to an electrode. The secondary coil should be resonantly tuned to the oscillation of the charge in the primary coil (the principle of Tesla's transformer).

Lopašić describes the electrical phenomena obtained using Tesla's transformer in an interesting manner. When the device is working, from the top of the secondary coil there is electrical discharge with sparks in the air that are over a half a meter in length. Near the Tesla transformer, fluorescent tubes that are not connected to the transformer are lit. An electrical spark from the transformer can set wood on fire. When such a spark is received with a metal electrode held in a bare hand, no electrical shock is felt. In order to obtain very high voltage, Lopašić used a Ruhmkorff inductor in experiments with Tesla's transformer. Lopašić describes the principle of the operation of the inductor especially vividly, in order for students to understand the essence and application of the law of electromagnetic induction.

Prof. Tomo Bosanac (Stare Plavnice near Bjelovar, May 15, 1918 - Zagreb, August 12, 2003), a distinguished instructor at the Faculty of Electrical Engineering and Computing in the department of theoretical electrical engineering, also emphasized the importance of the use of the Ruhmkorff inductor in Tesla's investigation of HF currents [15] and [16]. According to Bosanac, the Ruhmkorff inductor was used before Tesla for obtaining high frequencies, but Tesla was the first to use it as a true transformer to which he added an improved spark gap so that energy losses in the spark gap would be minimal. In this manner, Tesla obtained powerful sources of *HF* currents of several million periods per second and numerous effects not seen before that made him famous. Nikola Tesla was the first experimental physicist to apply a transmission line as an oscillating system at high frequencies,

Simpozij 'Nikola Tesla' koji je uredio Tomo Bosanac [16]. U kontekstu 120. godišnjice Teslinog rođenja Školska knjiga u Zagrebu tiskala je lijepo dvojezično englesko-hrvatsko izdanje *Moji pronalasci / My Inventions* Nikole Tesle, u čijem je prevodu sudjelovao Tomo Bosanac i za koju je napisao pogovor [8].

Profesor Tomo Bosanac je autoru ovog rada dao i poticaj za proračun Tesline unipol-antene za sustav antena-zemlja, daleke 1976. na tragu i odjecima uspješnog međunarodnog simpozija o 120. obljetnici Teslinog rođenja u Zagrebu u organizaciji JAZU [17]. Teslin model bežičnog prijenosa elektromagnetske snage ili poruke na daljinu na fundamentalnoj Teslinoj intuiciji o svjetskom bežičnom sustavu postao je iznova zanimljiv 2006. povodom 150. obljetnice rođenja i Tesline godine. Proračuni su ponovno izvedeni i dotjerani na razdjelnici između Teslinog načina prijenosa koji koristi zemlju te Hertzovog za slobodni prostor, a rezultati su pokazani u poglavlju 3.2 u ovom članku.

Teslin najvažniji izum u elektrotehnici jesu višefazne izmjenične struje, osobito trofazne. Trofazni sustav najobičniji je i najrašireniji način proizvodnje i prijenosa električne energije. U svibnju 1885. George Westinghouse, šef istoimene električne kompanije u Pittsburghu, otkupio je u dogovoru s Teslom patentna prava na Teslin višefazni sustav izmjeničnih struja, uključujući generator višefaznog napona, transformator te asinkroni Teslin elektromotor na principu rotirajućeg magnetskog polja. Te je godine započela divovska bitka između Edisonovog sustava zasnovanog na istosmjernoj struji i Tesla-Westinghouse izmjeničnog sustava. Pobijedio je Teslin sustav, uvodeći čovječanstvo divovskim koracima u modernu civilizaciju elektroenergetike i elektroindustrije.

Prema Lopašiću, otkriće višefaznih električnih izmjeničnih struja ostaje Tesli kao njegov trajni spomenik i doprinos čovječanstvu. Pomoću trofaznih struja koje se šalju kroz prostorno zgodno raspoređene zavojnice može se kao rezultirajuće magnetsko polje dobiti takvo u kojemu jakost polja uvijek ima isti iznos, ali mu se smjer u prostoru vrti. Ako su zavojnice raspoređene tako da im osi leže u istoj ravnini i čine kutove po 120° , pa kroz te zavojnice tjeramo izmjenične struje pomoću napona redom iz faza R, S, T , onda rezultirajuće polje \vec{H} u sjecištu osi zavojnica ne mijenja svoju jakost, ali se vrti u smislu slijeda faza kutnom brzinom ω . Međutim, metalni vodič na tom mjestu počne pratiti vrtnju polja jer se u njemu induciraju struje na koje magnetsko polje zavojnica djeluje silama. To odgovara pojavi tzv. rotacijskog

earlier than the celebrated physicists Hermann von Helmholtz and J. J. Thomson. Tomo Bosanac was one of the principal initiators of the formal commemoration of the 120th anniversary of the birth of Nikola Tesla that was held in Zagreb in the year 1976. For this event, the proceedings of the Nikola Tesla Symposium organized by Tomo Bosanac were published by the Yugoslav (now Croatian) Academy of Arts and Sciences [16]. In the context of the 120th anniversary of Tesla's birth, the publisher Školska knjiga in Zagreb printed an attractive English-Croatian edition of *My Inventions/Moji pronalasci* by Nikola Tesla, for which Tomo Bosanac was one of the translators and the author of the epilogue [8].

In 1976, Prof. Tomo Bosanac also gave the author of this article the impetus for the calculation of Tesla's monopole antenna for the antenna ground system, during the aftermath of the previously mentioned symposium [17]. Tesla's model of the long-distance wireless transmission of electromagnetic power or messages based on Tesla's fundamental intuition about the world wireless system is attracting renewed attention in 2006, on the occasion of the 150th anniversary of Tesla's birth and the Nikola Tesla Year. Calculations have once again been performed and revised for Tesla's approach based on energy transmission by the earth and Hertz's approach using free space. The results are presented in Chapter 3.2 of this article.

Tesla's most important inventions in electrical engineering are multiphase alternating currents, especially three-phase. The three-phase system is the most common and most widespread manner of producing and transmitting electrical energy. In May 1885, George Westinghouse, head of the company of the same name in Pittsburgh, purchased the patent rights to Tesla's multi-phase system of alternating current, including a multi-phase voltage generator, transformer and Tesla's asynchronous electrical motor on the principle of the rotating magnetic field. That year, a tremendous battle was waged between Edison's system based on direct current and the Tesla-Westinghouse alternating system. Tesla's system won, bringing humankind into the modern era of electrical energy and industry.

According to Lopašić, the discovery of multi-phase alternating currents remains Tesla's lasting monument and contribution to humankind. Using three-phase currents that are sent through coils that are appropriately positioned in space, it is possible to obtain a magnetic field in which the magnetic field strength always has a constant value but is rotating in space. If the coils are spaced at 120° from one another, and three-phase AC voltage (R, S, T) is applied to the coils, the resulting magnetic field strength \vec{H} at the intersection point of the coil axes does not change its strength but rotates following the phase sequence at an angular velocity

magnetizma u pokusu koji je Dominique F. Arago (2. listopada 1786.-26. veljače 1853.) izveo 1825., samo se ovdje vrti polje, a ondje se vrtio vodič. Rotirajuće magnetsko polje osnova je rada Teslina asinkronog elektromotora.

5 UMJESTO ZAKLJUČKA - TESLINI IZUMI I NJEGOV INTERES ZA GOETHEOVOM POEZIJOM

Poznato je da je Tesla najdulje i najbolje studirao na Technische Hochschule u Grazu (1875.-1878.), da bi obrazovanje potom nastavio u Pragu. Studij filozofije prirode upisao je 1880. na Sveučilištu u Pragu, ali je već 1881. prešao u Budimpeštu gdje se zapošljava u Središnjem telegrafskom uredu. U Budimpešti u veljači 1882. dobiva najvažniju intuiciju u svom životu o rotirajućem magnetskom polju. Šetajući gradskim parkom s prijateljem Antonyjem Szigetyjem, recitirajući ulomak iz Fausta, Tesli je u njegovu umu poput bljeska munje sinula ideja o rotirajućem magnetskom polju. On je istog trenutka štapom u pijesku nacrtao dijagram takvog polja, a Szigety je odmah shvatio o čemu je riječ. Ponovila se, dakle, starogrčka platonovska situacija kad je Sokrat robu crtanjem na pijesku uspješno objasnio Pitagorin poučak (Menon, dijalog iz prijelaznog razdoblja Platonova stvaralaštva). Fizikalnu sliku i objašnjenje rotirajućeg magnetskog polja \vec{H} upravo smo opisali u prethodnom odjeljku 4.2.

Navodimo ulomak iz Goetheova Fausta [18] [19] koji je Tesli, prema njegovu vlastitom tumačenju, pomogao u otkriću najveće tajne koju je uspio iščupati iz prirode:

PRED GRADSKIM VRATIMA

FAUST

Već tone sunce, zamire već dan,
Al ono drugdje novi život stvara.
O, imat krila –moj je davni san,
O, letjet za ljepotom toga žara!
...
Da, divna sna! al sunce zapada.
Ah, čovjek ima krila duhovna,
Al tjelesna mu bozi nisu dali.

of ω . However, the metal conductor at that position starts to follow the rotating magnetic field because of the currents induced in it that are affected by the forces of the coils' magnetic field. This corresponds to the phenomenon of so-called rotating magnetism in an experiment performed by Dominique F. Arago (October 2, 1786-February 26, 1853) in 1825, only here it is the field that turns and there the conductor turned. A rotating magnetic field is the basis of the operation of Tesla's asynchronous electric motor.

5 IN LIEU OF A CONCLUSION - TESLA'S INVENTIONS AND INTEREST IN GOETHE'S POETRY

It is known that Tesla studied the longest and best at the Technische Hochschule in Graz (1875-1878), and continued his education in Prague. He enrolled in the study of natural philosophy in 1880 at the University of Prague but already in 1881 went to Budapest where he was employed at the Central Telegraphic Office. While in Budapest in February 1882, he experienced the most significant intuition of his life regarding the rotating magnetic field. Walking in the city park with his friend Antal Szigety, reciting an excerpt from Faust, the idea of the rotating magnetic field struck Tesla like a bolt of lightning. He immediately drew a diagram of such a field in the sand with a stick, which Szigety immediately understood. Thus, the ancient Greek Platonic situation was repeated when Socrates successfully explained the Pythagorean Theorem to a slave by making a drawing in the sand (Meno, dialogue from the transitional period of Plato's works). We have presented the physical picture and explanation of the rotating magnetic field \vec{H} in the previous Chapter, 4.2.

We present the passage from Goethe's Faust [18] [19] which helped Tesla, according to his own account, to discover the greatest secret that he successfully wrested from nature.

BEFORE THE CITY GATES

FAUST

The sun retreats – the day, outlived, is o'er,
It hastens hence and lo! a new world is alive!
Oh, that from earth no wing can lift me up to soar
And after, ever after it to strive!
...
A lovely dream, the while the glory fades from sight.
Alas! To wings that lift the spirit light
No earthly wing will ever be a fellow.

VOR DEM TOR

FAUST

Sie rückt und weicht, der Tag ist überlebt,
Dort eilt sie hin und fördert neues Leben.
O daß kein Flügel mich vom Boden hebt,
Ihr nach und immer nach zu streben!

...

Ein schöner Traum, indessen sie entweicht.
Ach! zu des Geistes Flügeln wird so leicht
Kein körperlicher Flügel sich gesellen.

U Faustu Goethe pjeva o borbi dobra i zla, duha i tijela, života i nihilizma, na najvećoj kozmičkoj skali. Pokretač i glavni protagonist te borbe na jednoj strani jest novovjekovni znanstvenik Faust, razočaran i uznemiren u svojim znanstvenim težnjama, a na drugoj đavolska spodoba u liku Mefistofelesa, kao partnera i protivnika na Faustovu istraživačkom putu (putovanju). Takva filozofska i pjesničko-mistička slika dojmila je Teslu i silno ga privlačila tijekom cijelog života. Osobito Faustov filozofski izbor koji ovozemaljske radosti koje nudi Mefistofeles podređuje fundamentalnom opredjeljenju za ljudsku kreativnost, rad i slobodu, koje na povijesnoj i kozmičkoj skali znače napredak čovječanstva.

Tesla je svoje izume u fizici i elektrotehnici otkrivao ili uviđao onakvom intuicijom kakvu je René Descartes propisao i komentirao u 3. pravilu o jasnoj i očitoj intuiciji, u svom prvom važnom filozofskom djelu metodičke naravi: Pravila za usmjeravanje naše urođene inteligencije (lat. izvornik: *Regulae ad directionem ingenii*). Descartes je najvjerojatnije ovo kratko djelo napisao oko 1628. ili koju godinu prije. U komentaru 3. pravila, kad govori o intuiciji, Descartes je stvorio zanimljiv pojam urođene svjetlosti: poimanja (lat. *ratione luce*), u francuskom jeziku: *lumière innée* (*lumière naturelle*), odnosno: light of reason na engleskom jeziku. Tomu Descartesovu idealu najbolje se približava Nikola Tesla svojim fundamentalnim otkrićima u elektromagnetizmu i pripadajućim tehnologijama. Pozadinu modernog procesa globalizacije i globalnog umrežavanja čini informacijsko-komunikacijska tehnologija (u filozofskome jeziku elektromagnetska kultura) gdje se protoci informacija događaju najvećim mogućim brzinama koje odgovaraju Descartesovu idealu. Teslino je djelo u temeljima takve suvremene kulture. Teslino ime, djelo i njegov kozmopolitizam, napose Teslina strast za znanstvenim pomaganjem čovječanstvu, ostaju trajnim uzorom u ljudskoj znanosti i kulturi.

VOR DEM TOR

FAUST

Sie rückt und weicht, der Tag ist überlebt,
Dort eilt sie hin und fördert neues Leben.
O daß kein Flügel mich vom Boden hebt,
Ihr nach und immer nach zu streben!

...

Ein schöner Traum, indessen sie entweicht.
Ach! zu des Geistes Flügeln wird so leicht
Kein körperlicher Flügel sich gesellen.

In Faust, Goethe tells of the struggle between good and evil, the spirit and body, life and nihilism, on the highest cosmic scale. The moving force and main protagonist in this struggle on the one side is the scientist Faust, disappointed and restless in his scientific aspirations, and on the other side the satanic figure of Mephistopheles, as a partner and opponent on Faust's investigative journey. Such a philosophical and poetic-mystical image made a profound impression on Tesla and greatly attracted him throughout his life. It was particularly Faust's philosophical choice, the rejection of the joys of this world as offered by Mephistopheles in favor of a fundamental commitment to human creativity, work and freedom, which signifies the advancement of humankind on the historical and cosmic scale.

Tesla discovered or obtained insight into his inventions in physics and electrical engineering with the same intuition that René Descartes commented upon in his first important philosophical work of a methodological nature, *Regulae ad directionem ingenii* (The Rules for the Direction of the Mind). Descartes probably wrote this brief work around the year 1628 or some years earlier. In the commentary on the third rule that speaks of intuition, Descartes created an interesting concept of the light of reason (Latin: *ratione luce*, in the French language: *lumière innée*, *lumière naturelle*). Nikola Tesla approaches Descartes' ideal with his fundamental discoveries in electromagnetism and the corresponding technologies. The background of the modern process of globalization and global networking is the information/communication technologies (in the philosophical language, the electromagnetic culture), where the flow of information occurs at the greatest possible speeds that correspond to Descartes' ideal. Tesla's work has been incorporated into the foundations of our contemporary culture. Tesla's name, work and cosmopolitanism, particularly his passion for helping mankind through science, remain a lasting model in human science and culture.

LITERATURA / REFERENCE

- [1] PETKOVIĆ, T., Znanstveni izvori bioetike, Primjer Enrica Fermija, posljednjeg univerzalnog fizičara, Filozofska istraživanja 83, God. 21, Sv. 4, pp. 633-645, 2001.
- [2] PETKOVIĆ, P., Franciscus Patricius' model of thinking and modern cosmology, poglavlje u knjizi: Francesco Patrizi filosofo platonico nel crepuscolo del Rinascimento, P. Castelli, ed., Florence: Leo S. Olschki, 2002, pp. 197-215.
- [3] PETKOVIĆ, T., Werner Heisenberg - čovjek i djelo. Povodom 100. obljetnice rođenja, Matematičko-fizički list 208 (2001.-2002.), God. LII, Zagreb, 2002., str. 226-228.
- [4] PETKOVIĆ, T., O znanstveno-inženjerskom duhu i enciklopedijskome djelu akademika Hrvoja Požara, Hrvatski identitet, 3. program Hrvatskog radija, tekst 8 stranica, emisija 29. srpnja 2003.
- [5] PETKOVIĆ, T., L'universo poetico di Nikola Šop fra le forme noetiche di Platone e lo spazio-tempo einsteiniano, poglavlje u knjizi: La poesia di Nikola Šop (1904.-1982.), Tra filosofia e cosmologia, ur. F. Ferluga-Petronio, Marsilio Editori, Venezia, 2004, str. 125-134
- [6] PETKOVIĆ, T., Mirko Dražen Grmek i njegov model povijesti znanosti, Hrvatsko zagorje, Časopis za kulturu, Br. 2, Krapina, prosinac 2001., God. VII., str. 117-122
- [7] NIKOLA TESLA, Colorado Springs - Notes, Nolit, Beograd, 1978.
- [8] NIKOLA TESLA, Moji pronalasci / My Inventions, preveli: prof. dr. Tomo Bosanac i Vanja Aljinović, Školska knjiga, Zagreb, 1984.
- [9] WIEDEMANN, H., Particle Accelerator Physics, Basic Principles and Linear Beam Dynamics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.
- [10] GENG, R. L., PADAMSEE, H., SEAMAN, A., SHEMELIN, V. D., World Record Accelerating Gradient Achieved in a Superconducting Niobium RF Cavity, Proceedings of the Particle Accelerator Conference, PAC 2005, 16-20 May 2005, pp. 653-655.
- [11] Proceedings of the 1st TESLA Workshop, Cornell University, Ithaca, NY, CLNS 90 -1029 (1990).
- [12] SOMMERFELD, A. N., Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie, Annalen der Physik, Bd. 28 (1909), S. 665-736
- [13] SUPEK, I., Povijest fizike, II. dop. izd., Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [14] LOPAŠIĆ, V., Predavanja iz fizike: Elektromagnetsko polje, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- [15] BOSANAC, T., Teoretska elektrotehnika, I. dio, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.
- [16] Simpozij "Nikola Tesla", u okviru programa proslave 120. obljetnice rođenja Nikole Tesle, Zagreb - Smiljan/Gospić, 7.-10. srpnja 1976., urednik: BOSANAC, T., JAZU, Zagreb, 1978.
- [17] PETKOVIĆ, T., Fizikalna analiza linearne unipol-antene i njezin proračun, neobjavljeni rad, Zavod za fiziku, ETF, Zagreb, 1976.
- [18] GOETHE, J. W., Faust I i II dio, Tragedija, preveo Tito Strozzi, Zora i Matica hrvatska, Zagreb, 1970.
- [19] GOETHE, J. W., Faust I und Faust II, Eine Tragödie, Werke Sechster Band, Insel Verlag, Frankfurt am Main, 1981.

Uredništvo primilo rukopis:
2006-05-15

Manuscript received on:
2006-05-15

Prihvaćeno:
2006-06-14

Accepted on:
2006-06-14

Zahvala

Članak o Tesli napisan je u stvaralačkom valu, brzo, na nagovor kompetentnih znanstvenika, stručnjaka i filozofa u ozračju 150. obljetnice Teslinog rođenja i Tesline godine 2006. U brzome nastajanju članka u računalnome oblikovanju slika mnogo je pomogao mr. sc. K. Gergeta, znanstveni novak/asistent u Zavodu za primijenjenu fiziku FER-a. Napose se zahvaljujem T. Petkoviću ml., dipl. ing., znanstvenome novaku/asistentu u Zavodu za elektroničke sustave i obradu informacija FER-a, za čitanje i matematičke korekcije u engleskoj inačici članka.

Acknowledgments

This article on Tesla was written in a creative heat, quickly, at the behest of competent scientists, experts and philosophers in commemoration of the 150th anniversary of Tesla's birth and the Nikola Tesla Year 2006. K. Gergeta, MSc, scientific novice/assistant at the Department of Applied Physics, Faculty of Electrical Engineering and Computing, provided significant assistance in preparing the figures in computer format. I am very grateful to T. Petković jr., dipl. ing., scientific novice/assistant at the Department of Electronic Systems and Information Processing, Faculty of Electrical engineering and Computing, for his careful mathematical correcting the English version of the paper.

ULOGA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U BUDUĆOJ OPSKRBI ELEKTRIČNOM ENERGIJOM THE ROLE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN FUTURE ELECTRICITY SUPPLY

Dr. sc. Malcolm W. Kennedy, CBE, FEng, FRSE, PB Power Ltd.,
Amber Court, William Armstrong Drive, Newcastle upon Tyne,
NE4 7YQ, Velika Britanija

Mr. sc. Zoran Stanić, HEP d.d., Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Malcolm W. Kennedy, CBE, FEng, FRSE, PhD, PB Power Ltd.,
Amber Court, William Armstrong Drive, Newcastle upon Tyne,
NE4 7YQ, United Kingdom

Zoran Stanić, MSc, HEP d.d., Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Croatia

Članak se bavi ulogom obnovljivih izvora energije u opskrbi električnom energijom. Izvorni razlog za njihovo uvođenje i razvoj bio je stvaranje protuteže porastu stvaranja stakleničkih plinova koji nastaju pri proizvodnji električne energije iz fosilnih goriva.

Europska unija predstavlja najbolji primjer delegirane politike i propisa koje zakonodavci i vlade prikladno tumače. Zakoni na području energije i okoliša usvojeni u Republici Hrvatskoj približili su se europskom zakonodavstvu, s ciljem integriranja Republike Hrvatske u unutarne europsko tržište električne energije i Europsku uniju.

This article deals with the role of renewable energy sources in the electricity supply industry. The original reason for their introduction and development was to help offset the rise in the production of greenhouse gases due to electricity generation from fossil fuels. The EU represents the best example of federally delegated policy and regulation interpreted differently by national regulators and governments. The laws in the area of energy and the environment enacted by the Republic of Croatia have been approximated to the European legislation in order for the Republic of Croatia to be integrated in the internal European electricity market and EU.

Ključne riječi: djelatnost opskrbe električnom energijom, energija vjetra, europsko tržište električne energije, proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora, Protokol iz Kyota, staklenički plinovi, tehnologije obnovljivih izvora

Key words: electricity supply industry, European electricity market, greenhouse gases, Kyoto Protocol, renewable electricity generation, renewable technologies, wind energy



1 UVOD

Čovječanstvo je dobivalo energiju tisućama godina paljenjem drva i drugih biomasa, za kuhanje, oblikovanje metala i grijanje. Od srednjovjekovnih vremena čovjek je također ukrotio potoke i rijeke za pogone mlinova i vjetar za mljevenje kukuruza. Energija iz obnovljivih izvora nije novost!

Povijest prvih stotinu ili više godina proizvodnje električne energije pokazuje da se osim razvoja hidroenergetike, koja je često vezana uz druge namjene (npr. navodnjavanje i zaštita od poplava), skoro sva ostala tehnologija proizvodnje temeljila na sagorijevanju ugljena, loživog ulja i plina, te u novije vrijeme na nuklearnoj fisiji. Ove toplinske tehnologije proizvodnje električne energije imaju bitnu prednost, a to je da se njima može pretvoriti i pridobiti energija visoke koncentracije, te su sukladno tome niskih prostornih zahtjeva.

Uspostavljene tehnologije bile su podložne trajnom i intenzivnom razvoju. Projektirane su uglavnom za priključenje na međusobno povezane mrežne sustave počev od 1920. pa nadalje, na regionalnoj, državnoj ili međunarodnoj osnovi. Cilj je bio proizvesti i dostaviti lako dostupnu i pouzdanu električnu energiju s odgovarajućom kombinacijom elektrana i najnižom mogućom cijenom. Društveni i ekološki utjecaji opskrbe električnom energijom donedavno su imali ograničenu važnost.

Međutim, tijekom proteklih 15-ak godina sve se više vjeruje u postojanje globalnog zagrijavanja i promjene klime, te u utjecaj koje navedeni proizvodni procesi imaju na ove pojave. Kako god bilo, postoji zajednička suglasnost oko pretpostavke da oni proizvodni procesi koji stvaraju tzv. stakleničke plinove, uglavnom ugljični dioksid, prijete u budućnosti stabilnosti naše globalne klime.

Globalna proizvodnja sve većih količina stakleničkih plinova sada se intenzivno kontrolira i mjeri, naročito ugljičnog dioksida (CO₂), koji je posljedica većine proizvodnih procesa, uključujući proizvodnju električne energije, potrošnju energije u domaćinstvima i prijevoz.

Prema Međunarodnoj organizaciji za energiju (IEA) [1], do 2030. globalne emisije CO₂ bit će 52 % veće u usporedbi s emisijama u 2005., osim u slučaju da svijet obuzda svoju potrošnju energije. Čak i ako razvijene države počnu provoditi politiku vezanu uz promjenu klime, IEA smatra da će globalna emisija CO₂ ipak porasti za otprilike 30 % tijekom ovog razdoblja.

Međunarodnim Protokolom iz Kyota iz 1997., ratificiranim tek 2005., tražilo se smanjenje

1 INTRODUCTION

Mankind has extracted energy for thousands of years from the burning of wood and other biomass materials for cooking, shaping of metal and keeping warm. Since medieval times, he has also harnessed streams and rivers to drive mills and wind to grind corn. Renewable energy is not new!

The history of the first 100 years or more of the generation of electricity shows that apart from the development of hydro, which was often coupled to other purposes, e.g. irrigation and flood control, virtually all the remainder of generation technology has been based upon the burning of coal, oil and gas and more recently nuclear fission. These thermal methods of electricity production have the intrinsic advantage of being able to convert and capture energy of high concentration and correspondingly low space requirements.

These established technologies were subject to continuous and intensive development, and were designed mainly for connection to interconnected grid systems from the 1920s onwards on either a regional, national or international basis. The aim was to produce and deliver electricity with an appropriate plant mix at the lowest cost and with high availability and reliability. The social and environmental impacts of electricity supply were of limited importance until recently.

Over the past 15 years or so, however, there has been a growing belief in the existence of global warming, climate change and the impact that industrial processes have on these phenomena. By common consent, however, those industrial processes that produce so-called greenhouse gasses, principally carbon dioxide, are now assumed to threaten the future stability of our global climate.

The global production of ever higher levels of greenhouse gasses, notably the carbon dioxide (CO₂) arising from most industrial processes, including the production of electricity, domestic energy consumption and transport, are now under intense scrutiny and measurement.

According to the International Energy Agency (IEA) [1] global emissions of CO₂ will be 52 % higher by 2030 compared to the emissions in 2005 unless the world curbs its energy consumption. Even if developed nations implement climate change policies, global CO₂ emissions will still rise according to the IEA by some 30 % over this period.

The international 1997 Kyoto Protocol, not ratified until 2005, sought a 5 % cut in CO₂ emissions

svjetskih emisija CO₂ za 5 % do 2012. godine. Sjedinjene Američke Države su zainteresirane za smanjenje emisija CO₂, ali njihovo nesudjelovanje u ostvarivanju ovog cilja smanjuje vjerodostojnost sporazuma iz Kyota.

Kao predvodnik svjetskog pokreta za smanjenje emisija, Velika Britanija, koje je odgovorna za samo 2 % globalne emisije CO₂, postavila si je za cilj 20-postotno smanjenje do 2010. u usporedbi s brojkama iz 1990. Malo je vjerojatno da će se taj cilj ispuniti.

Budući da je proizvodnja električne energije jedan od ključnih izvora emisije CO₂ (u Velikoj Britaniji odgovorna je za 22 % ukupne proizvodnje CO₂), nije iznenađujuće što su vlade diljem svijeta usmjerene na djelatnost opskrbe električnom energijom radi smanjenja emisije CO₂. Ta usmjerenost na proizvodnju električne energije nešto je lakša od usmjerenosti na prijevoz, proizvodnju i domaćinstva, koji su mnogobrojniji, raznolikiji i imaju veću političku interakciju.

Jedan od najznačajnijih doprinosa smanjenju emisija iz proizvodnje električne energije je uvođenje i razvoj tzv. proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, od koje se očekuje da će tijekom vremena imati sve veći udjel u isporučenoj električnoj energiji. Posebice u Europi, predviđen opseg proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora koji se sada shvaća kao smjernica, vjerojatno će uskoro postati obavezan [2]. Gospodarskim poticajima na razini vlada podržava se postizanje predviđenih opsega proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora.

2 DJELATNOSTI OPSKRBE ELEKTRIČNOM ENERGIJOM U EUROPI

Radi razumijevanja konteksta djelatnosti proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, nužno je opisati stanje elektroprivredne djelatnosti u Europi, u kojoj proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora postaje sve značajniji dio.

Europska unija predstavlja najbolji primjer delegirane politike i propisa koje nacionalni regulatori i vlade prikladno tumače. Nije iznenađujuće što se u cijeloj Europskoj uniji politika ne primjenjuje ravnomjerno, a usklađenost je još uvijek ozbiljno pitanje.

Prva Direktiva Europske unije o opskrbi električnom energijom [3] datira od prije skoro 10 godina, a u njoj je prvi put uvedeno načelo otvorenog pristupa sustavu i konkurencije u proizvodnji i opskrbi.

worldwide by 2012. The United States is not indifferent to the reduction of CO₂ emissions but its non-participation in this target-based approach diminishes the Kyoto agreement's credibility.

As a leader in the world movement to reduce emissions, the UK, which is responsible for only 2 % of global CO₂ emissions, has set its own target of a 20 % reduction by 2010 compared to 1990 figures. This target is unlikely to be met.

Since the generation of electricity is one of the main sources of CO₂ emissions (in the UK it is responsible for 22 % of all CO₂ production), it is not surprising that the electricity supply industry is being targeted by governments throughout the world to reduce its emissions. This targeting of electricity production is slightly easier than the targeting of transport, industry and domestic sources, which are much more numerous, more diverse and have greater political interaction.

One major contribution to the reduction of emissions from the production of electricity is the introduction and development of so-called renewable generation, which is now expected to provide an increasing proportion of the electricity supplied with the passage of time. Particularly in Europe, the targets for the production of electricity generated from renewable sources, although currently regarded as guidelines, are likely to become mandatory [2]. To achieve the specified amounts of renewable generation, the attainment of these targets is being supported by government-inspired economic incentives.

2 OVERVIEW OF THE ELECTRICITY SUPPLY INDUSTRY IN EUROPE

To place the development of renewable electricity generation in context, it is first necessary to describe the background of the electricity supply industry (ESI) in Europe, of which it forms an increasingly important part.

The EU represents the best example of federally delegated policy and regulation interpreted differently by national regulators and governments. Not surprisingly, policy has not been evenly applied throughout the EU and compliance is still a serious issue.

The first EU Directive of Electricity Supply [3] dates back almost 10 years ago, in which the principles of open system access and competition in generation and supply were first introduced. A more recent

Novija Direktiva, 2003/54/EC [4] uvedena je prije tri godina zbog sporog napretka ostvarenog od 1996.

Najnoviji Godišnji izvještaj o napretku, u skladu s tom posljednjom Direktivom, izdan je u studenom 2005. [5]. Ovaj Izvještaj o napretku u stvaranju unutarnjeg tržišta plina i električne energije potvrđuje da prekogranična konkurencija još uvijek nije dovoljno razvijena da bi kupcima pružila realne alternative nacionalnih dobavljača. Ključni su pokazatelji u tom smislu neujednačenost cijena diljem Europske unije i niska razina prekogranične trgovine električnom energijom. Najvažniji uzrok tome je što države članice nisu Direktive primijenile pravovremeno ili dovoljnim odlučno.

U ovoj je fazi prepoznato pet područja lošeg funkcioniranja tržišta:

- tržišta plina i električne energije u mnogim su državama članicama i dalje koncentrirana, što domaćim operaterima daje mogućnost utjecanja na cijenu,
- mnoga veleprodajna tržišta nisu likvidna, ili zbog dugoročnih ugovora (plin), ili zato što tvrtke djeluju istovremeno u proizvodnji i maloprodaji, ograničavajući na taj način razvoj veleprodajnih tržišta (električna energija). Razina razdvajanja mreže i opskrbnih aktivnosti također je nedovoljna,
- prepreke prekograničnoj opskrbi plinom i električnom energijom sprječavaju razvoj integriranog tržišta energije Europske unije,
- manjak transparentnosti na tržištu, što koristi domaćim operaterima, a potkopava položaj novih sudionika. Nedovoljna transparentnost također pojačava nepovjerenje,
- elektroprivreda i potrošači nemaju dovoljno povjerenja u mehanizme određivanja cijene na veleprodajnim tržištima energije, a cijene su značajno porasle.

3 POLITIKA PREMA PROIZVODNJI ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ OBNOVLJIVIH IZVORA

Posljednjih su godina Vlade u cijelome svijetu prepoznale izvore emisije CO₂ kao prvi korak prema pronalasku rješenja. Ovi se izvori mogu općenito grupirati, kako je prikazano u tablici 1 koja vrijedi za Veliku Britaniju, ali je svojstvena svim industrijaliziranim zemljama. Treba spomenuti da nacionalni udjeli CO₂ ne uključuju međunarodni zračni promet i aktivnosti na moru, što su najbrže rastući izvori.

Directive, 2003/54/EC [4], was introduced 3 years ago in view of the slow progress achieved since 1996.

The latest Annual Report on progress in compliance with this latest directive was issued in November 2005 [5]. This Report on the Progress in Creating the Internal Gas and Electricity Market confirms that cross-border competition is not yet sufficiently developed to provide customers with a real alternative from the nationally established suppliers. Key indicators in this respect are the absence of price convergence across the EU and the low level of cross-border trade in electricity. The most important cause for this is the failure of Member States to implement the directives on time or with sufficient determination.

Five areas of market malfunctioning have been identified at this stage:

- gas and electricity markets in many Member States continue to be concentrated, creating scope for incumbent operators to influence prices,
- many wholesale markets are not liquid, either because of long-term contracts (gas) or because companies are active both in production and in the retail market, limiting the development of wholesale markets (electricity). There is also an inadequate level of unbundling of network and supply activities,
- barriers to the cross-border supply of gas and electricity prevent the development of integrated EU energy markets,
- there is a lack of transparency on the markets that benefits incumbents and undermines the position of new entrants. Lack of transparency also aggravates mistrust,
- there is little trust by industry and consumers in the specific price formation mechanisms on energy wholesale markets and prices have increased significantly.

3 CURRENT POLICY RELATING TO RENEWABLE ELECTRICITY GENERATION

Over recent years, governments worldwide have identified sources of CO₂ emissions as a first step towards finding remedies. These sources can be broadly grouped as shown in Table 1, which applies to the UK but is typical of industrialised countries. It should be noted that national allocations of CO₂ do not include international air travel and marine activities, which are the fastest growing sources.

Tablica 1 - Emisije CO₂ u Velikoj Britaniji: Udjeli sektora
Table 1 - UK CO₂ emissions: Sector contributions

Korisnik/Zagađivač / User/Polluter	Postotak ukupne emisije CO ₂ u Velikoj Britaniji / Percentage of Total UK CO ₂ Emissions
Prijevoz* / Transport*	26
Industrija / Industry	24
Proizvodnja električne energije / Electricity Generation	22
Kućanstva / Domestic	14
Trgovina / Commercial	12
Drugo / Other	2

*Nisu uključeni međunarodni zračni i morski prijevoz, koji imaju najbrži rast /

*Fastest growing, international air and marine transport not included

U tablici 2 navode se porezi i poticaji koje je uvela britanska Vlada tijekom proteklih 15 godina s ciljem smanjenja emisija iz elektroenergetskog sektora i poticanja razvoja proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora.

Table 2 indicates taxation and incentives introduced by the UK Government over the past 15 years to inhibit emissions from the electricity sector and encourage the development of renewable generation.

Tablica 2 - Poticaji britanske vlade proizvodnji energije iz obnovljivih izvora
Table 2 - UK Government encouragement of renewable generation

Obveza nefosilnog goriva / Non-fossil Fuel Obligation	1991.
Naknada za klimatske promjene / Climate Change Levy	1999.
Energetska revizija Odjela za djelotvornost i inovativnost / Performance and Innovation Unit's Energy Review	2001.
Uvođenje Certifikata o obvezi obnovljivih izvora / Introduction of Renewable Obligation Certificates (ROCS)	2002.
Bijela knjiga o energiji / Energy White Paper	2003.
Prošireni ciljevi i dodatni novac / Extended Targets and Extra Money	2004.
EU Shema trgovanja emisijama / EU Emissions Trading Scheme	2005.

Što se tiče proizvodnje električne energije, ključne metode obuzdavanja rasta i mogućeg smanjenja emisija mogu se navesti na sljedeći način:

- proizvodnja iz čistog ugljena, npr. plin iz ugljena,
- uzimanje i uskladištenje ugljika iz ugljena i drugih fosilnih izvora,
- povećan udio nuklearne proizvodnje,
- uvođenje i razvoj proizvodnje energije iz obnovljivih izvora.

Prva i druga navedena tehnologija još uvijek zahtijevaju značajan tehnički razvoj prije no što će moći pružiti značajan doprinos. Treća tehnologija mora ukloniti troškovne i političke zapreke, te zapreke vezane uz stajalište javnosti u mnogim državama. To ostavlja proizvodnju iz obnovljivih izvora kao ključnu univerzalnu tehnologiju obustavljanja rasta proizvodnje ugljičnog dioksida iz opskrbe električnom energijom, gdje ne postoje ozbiljne tehničke prepreke.

Insofar as electricity generation is concerned, the main methods of arresting the growth and perhaps the reduction of emissions can be listed as follows:

- clean coal production, e.g. gas from coal,
- carbon capture and storage from coal and other fossil fuel sources,
- increased proportion of nuclear generation,
- introduction and development of renewable generation.

The first and second methods listed above still require significant technical development before they can be regarded as having a likely significant contribution to make. The third has possible cost, political and public perception hurdles to clear in many countries. This leaves renewable sources of generation as the main universal methods of arresting the growth of carbon dioxide production from electricity supply where there are no serious technical obstacles.

Kao što je prikazano u poglavlju 5, svi oblici proizvodnje energije iz obnovljivih izvora zahtijevaju neki oblik potpore kako bi bili atraktivniji ulagačima. Stoga je bitno da vlade priskrbe neki oblik potpore developerima ako se pojave vrijedni doprinosi vezani uz obnovljive izvore. U Velikoj Britaniji potpore se odnose na širok raspon tehnologija, sa značajnom iznimkom velikih hidroelektrana. Tablica 3 navodi tehnologije koje mogu dobiti potporu u Velikoj Britaniji.

As will be seen in Section 5, all forms of renewable generation require some form of subsidy to prove attractive to investors. It is, therefore, essential that governments provide some form of subsidy to developers if worthwhile contributions from renewable sources are to arise. In the UK, subsidy applies to a wide variety of technologies, with the notable exception of large-scale hydro. Table 3 indicates those technologies in the UK that attract subsidies.

Tablica 3 - Izvori energije koji zadovoljavaju uvjete za Obvezu obnovljivih izvora: Velika Britanija
Table 3 - Sources of energy eligible for the Renewables Obligation: UK

Izvor / Source	Zadovoljava uvjete / Eligibility
Deponijski plin / Landfill gas	✓
Kanalizacijski plin / Sewage gas	✓
Energija iz otpada / Energy from waste	Uvjete zadovoljava samo energija iz nefosilnih izvora / Only non-fossil derived energy will be eligible. Energija dobivena spaljivanjem mješovitog otpada ne zadovoljava uvjete / Energy from incinerating mixed waste will not be eligible. Energija iz nefosilnih elemenata dobivenih iz mješovitog otpada korištenjem naprednih tehnologija zadovoljava uvjete / Energy from the non-fossil derived element of mixed waste using advanced technologies will be eligible
Hidroelektrane s više od 20 MW iskazanog neto kapaciteta / Hydro exceeding 20 MW declared net capacity (dnc)	Samo elektrane stavljene u pogon nakon datuma Naredbe / Only stations commissioned after the date the order is made
Hidroelektrane iskazanog neto kapaciteta 20 MW ili manje / Hydro 20 MW or less dnc	✓
Vjetar na kopnu (onshore) / Onshore wind	✓
Vjetar na moru (offshore) / Offshore wind	✓
Suizgaranje biomase / Co-firing of biomass	Zadovoljava uvjete do 31. ožujka 2011., za do 25 % dobavljačeve obveze / Eligible until 31 March 2011 for up to 25 % of a supplier's obligation Najmanje 75 % biomase mora biti od energetske nasade od 1. travnja 2006. / At least 75 % of biomass fuel to be energy crops from 1 April 2006
Druga biomasa, npr. poljoprivredni ostaci i ostaci u šumarstvu / Other biomass, e.g. agricultural and forestry residues	✓
Geotermalna energija / Geothermal power	✓
Energija plime i plimne struje / Tidal & tidal stream power	✓
Energija valova / Wave power	✓
Fotonaponska tehnologija / Photovoltaics	✓
Energetski nasadi / Energy crops	✓

Osim Europske unije, mnoge su druge države usvojile ciljeve, zakonske obaveze i odredile financijske poticaje za promicanje razvoja proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. Te

Besides the EU, many other countries have adopted targets, legal obligations and financial incentives to promote the development of renewable power generation. These countries include those with

države uključuju i one s različitim političkim nazorima, kao na primjer Australiju, Brazil, Kanadu, Indiju i Sjedinjene Američke Države. U većini slučajeva određeni su postoci opskrbe električnom energijom koji se moraju postići do definiranih datuma. Države koje nisu potpisale protokol iz Kyota također su usvojile ciljeve, kao napr. Australija i mnoge države u SAD-u.

U ovom se dokumentu, međutim, pobliže razmatraju isključivo ciljevi i poticaji u Europi. Ti su ciljevi možda isprva samo indikativni, ali vjerojatno će s vremenom postati obvezni.

U 2001. [2] Europska unija odredila je za cilj 22-postotni udio električne energije dobivene iz određenih obnovljivih izvora. Ovaj bi se cilj trebalo postići do 2010. Cilj zatim raste do 33 posto ukupne isporučene električne energije do 2020. godine. Tablica 4 pokazuje analizu po pojedinim udjelima 15 zemalja članica 2001. Treba se napomenuti da je državama kao što su Austrija, Švedska i Portugal već 1997. određen vrlo visok postotak energije iz obnovljivih izvora, sukladno visokim razinama postojeće hidroproizvodnje.

varying political outlooks such as Australia, Brazil, Canada, India and the United States. In most cases, the percentages of electricity supply at milestone dates are specified. Non-signatories to the Kyoto Protocol have also adopted targets examples, including Australia and many states in the US.

In this paper, however, only targets and incentives in Europe are discussed in detail. These targets may be indicative at first but are likely to become mandatory with the passage of time.

In 2001 [2] the EU set a target of 22 % for the proportion of electricity to be supplied from defined renewable sources. This target is to be achieved by 2010. The target then rises to 33 % of all electricity supplied by 2020. Table 4 shows the individual breakdowns allocated to the 15 Member States as of 2001. It should be noted that countries such as Austria, Sweden and Portugal have been allocated a very high percentage of renewable figures, even in 1997, because of the correspondingly high levels of installed hydro capacity.

Tablica 4 - Nacionalni indikativni ciljevi za udio električne energije dobivene iz obnovljivih izvora energije (OIE) u ukupnoj potrošnji električne energije (E) do 2010.
Table 4 - National indicative targets for the contribution of electricity produced from renewable energy sources (RES) to gross electricity consumption (E) by 2010

	OIE-E- u TWh 1997. / RES-E TWh 1997	OIE-E u % 1997. / RES-E % 1997	OIE-E % 2010. / RES-E % 2010
Belgija / Belgium	0,86	1,1	6,0
Danska / Denmark	3,21	8,7	29,0
Njemačka / Germany	24,91	4,5	12,5
Grčka / Greece	3,94	8,6	20,1
Španjolska / Spain	37,15	19,9	29,4
Francuska / France	66,00	15,0	21,0
Irska / Ireland	0,84	3,6	13,2
Italija / Italy	46,46	16,0	25,0
Luksemburg / Luxembourg	0,14	2,1	5,7
Nizozemska / Netherlands	3,45	3,5	9,0
Austrija / Austria	39,05	70,0	78,1
Portugal / Portugal	14,30	38,5	39,0
Finska / Finland	19,03	24,7	31,5
Švedska / Sweden	72,03	49,1	60,0
Velika Britanija / United Kingdom	7,04	1,7	10,0
Zajednica / Community	338,41	13,9	22,0

Tablica 5 prikazuje ključne mehanizme potpore obnovljivim izvorima koje je usvojila svaka sadašnja zemlja članica Europske unije [6].

Table 5 shows the main renewable support mechanisms adopted by each of the current EU Member States [6].

Tablica 5 - Okvirna ekološka politika Europske unije: Proizvodnja električne energije
Table 5 - EU Environmental policy framework: Electricity generation

	Ključni mehanizmi potpore OIE / Main RES support mechanism	Dodatna proizvodnja 2004. (MW) / New addition to generation 2004 (MW)			
		ugljen nafta / coal/oil	plin / gas	OIE/ kogeneracija / RES/CHP	Ostalo (npr. nuklearna) / Other (eg nuclear)
Austrija / Austria	Zajamčena tarifa (prekinuto) / Feed in tariff (terminated)	0	+100	+500	0
Belgija / Belgium	Zeleni certifikati / Green certificates	-	-	-	-
Danska / Denmark	Fiksna nagrada / Fixed premium	-300	0	+100	0
Finska / Finland	Porezni poticaji / Tax incentives	0	0	+190	0
Francuska / France	Zajamčena tarifa/javni natječaji / Feed in tariff/tendering				
Njemačka / Germany	Zajamčena tarifa / Feed in tariff	+60	0	+2 550	+530
Grčka / Greece	Zajamčena tarifa/poticaji za ulaganje / Feed in tariff/investment incentives	-	-	-	-
Irska / Ireland	Javni natječaji / Tendering	0	0	+200	0
Italija / Italy	Zeleni certifikati / Green certificates				
Luksemburg / Luxembourg	Zajamčena tarifa / Feed in tariff	-	-	-	-
Nizozemska / Netherlands	Zajamčena tarifa / Feed in tariff	0	0	+1 000	0
Portugal / Portugal	Zajamčena tarifa / poticaji za ulaganje / Feed in tariff/investment incentives	-50	+390	+650	0
Španjolska / Spain	Zajamčena tarifa / Feed in tariff	0	+4 000	+2 000	0
Švedska / Sweden	Zeleni certifikati / Green certificates	-	-		-
Velika Britanija / UK	Zeleni certifikati / Green certificates	-	-	-	-
Norveška / Norway	nepoznato / n.k.	0	0	+250	0
Estonija / Estonia	Zajamčena tarifa / Feed in tariff	-	-	-	-
Letonija / Latvia	Zeleni certifikati / Green certificates	0	0	+1 000	0
Litva / Lithuania	Zajamčena tarifa / Feed in tariff	0	0	00	-1 300
Poljska / Poland	Zeleni certifikati / Green certificates	-65	+8	+145	0
Češka Republika / Czech Republic	Zajamčena tarifa / Feed in tariff	+50	+50	0	0
Slovačka / Slovakia	Zajamčena tarifa / poticaji za ulaganje / Feed in tariff/investment incentives	-	-	-	-
Cipar / Cyprus	Poticaji za ulaganje / Investment incentives				
Malta / Malta	Porezni poticaji / Tax incentives				
Zbroj približno / Total approx.		-350	+4 700	+8 500	-800

Ovi se mehanizmi mogu svrstati pod dva ključna naslova:

Sustavi s utvrđenom cijenom

Ti su sustavi uglavnom u obliku zajamčenih tarifa, što znači zajamčeno plaćanje proizvođaču po kWh od dobavljača ili kupca, pri čemu je određena cijena daleko iznad vjerojatne cijene za konvencionalnu proizvodnju. Potpore za ulaganje i porezne olakšice također pripadaju ovoj opsežnoj grupi, a usvojilo ih je nekoliko država.

Sustavi s kvotama energije iz obnovljivih izvora

Postižu se uglavnom putem zelenih certifikata, za koje vrijede metode temeljene na promjenjivoj cijeni na tržištu, uz obvezu proizvodnje određene količine energije iz obnovljivih izvora. Zelenim certifikatima može se trgovati i imaju promjenjivu tržišnu cijenu.

Tablica 5 pokazuje da države članice daju malu prednost zajamčenoj tarifi, koja se može pojedinačno odrediti za svaku usvojenu tehnologiju, npr. vjetar, valove, plimu itd.

Rješenje zajamčene tarife uklanja mnoge financijske rizike developerima, dok se, naprotiv, zeleni certifikati smatraju rizičnijima, ali možda i profitabilnijima za developere. Tablica 5 također navodi učinak koji su potpore imale na ukupan porast proizvodnih kapaciteta u Europskoj uniji tijekom 2004.

4 TEHNOLOGIJE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Prilično je sigurno da će u idućih 20 godina isključivo sljedeće tehnologije obnovljivih izvora imati značajan doprinos ukupnom razvoju proizvodnje energije iz obnovljivih izvora:

- vjetar na kopnu (onshore),
- vjetar na moru (offshore),
- valovi,
- plimna struja,
- fotonaponska tehnologija,
- biomasa,
- hidroenergetika,
- geotermalna tehnologija.

Slijedi procjena prvih šest spomenutih tehnologija jer se za preostale smatra da su dosegnule stupanj potpuno razvijene tehnologije.

These mechanisms can be classified under two main headings:

Fixed price systems

These mainly take the form of feed in tariffs, meaning a guaranteed payment per kWh to the generator from the supplier or customer set well above likely prices for conventional generation. Investment subsidies and tax credits also come under this broad heading and have been adopted by a few states.

Renewable quota systems

This is achieved mainly through green certificates, where variable price market-based methods apply with an obligation to supply specified amounts of renewable energy. Green certificates may be traded and have variable market values.

Table 5 shows a slight preference amongst Member States for feed in tariffs which may be set for each individual adopted technology, e.g. wind, wave, tidal, etc.

The feed in tariff arrangement removes many financial risks from the developer, whereas the green certificates are regarded as more risky but perhaps more profitable for the developer. Table 5 also indicates the effect that subsidies have had on the total addition of new generating plants in the EU during 2004.

4 RENEWABLE TECHNOLOGIES

Within the next 20 years, it seems fairly certain that only the following renewable technologies have the potential to make a significant contribution to the total renewable electricity generation development:

- onshore wind,
- offshore wind,
- wave,
- tidal flow,
- photovoltaic,
- biomass,
- hydro,
- geothermal.

An appraisal of the first six of the above follows, the remainder being considered to have reached mature technology.

4.1 Vjetar na kopnu (onshore)

Uspostavila se dominantna tehnologija za velike vjetrogeneratore; oni koje se danas postavljaju gotovo svi imaju vodoravne osi, s tri lopatice, uz vjetar (uz vjetar znači da vjetar doseže rotor prije tornja). Prije su uređaji imali stalnu brzinu vrtnje, pružali sinkronu proizvodnju, ali pridobivanje energije pri različitim brzinama vjetra učinkovitije je s promjenjivom brzinom generatora, tako da je danas većina vjetrogeneratora promjenjive brzine, s indukcijskim generatorima s dvostranim napajanjem.

Potrebno je riješiti još dva ključna pitanja da bi vjetrogeneratori postali potpuno usklađeni s mrežom. Prvo je sposobnost pružanja frekvencijskog i naponskog odziva operateru sustava, što znači da bi trebali raditi s dijelom opterećenja kako bi mogli povećati proizvodnju za postizanje istog. Budući da je energija vjetrogeneratora tako vrijedna u usporedbi s pogonskim troškom, koji je nepostojeći, postoji želja kod operatera vjetroelektrana da ne postupe u skladu s ovim zahtjevom. Ovo pitanje postaje sve važnije s porastom udjela energije vjetra. Drugo, u trenutku kvara u mreži vjetrogenerator mora moći raditi tijekom kvara i nastaviti proizvodnju bez crpljenja znatne reaktivne snage. Može čak biti potrebno da napaja mrežu reaktivnom snagom kako bi se nadoknadio manjak i pomoglo održati napon sustava. Jednom kada se mreža popravi, potrebno je obnoviti njezinu djelatnu snagu što je brže moguće. Puna mehanička snaga vjetrogeneratora nije dostupna odmah nakon popravka kvara mreže zbog položaja lopatica, što može utjecati na frekvenciju sustava ako je udio proizvodnje iz vjetra visok. Omogućavanje rada vjetrogeneratora tijekom kvara mreže pitanje je koje se razmatra, ali još uvijek nije riješeno.

Generatori na izravan pogon s permanentnim magnetom eliminiraju zupčani prijenosnik, koji je česti uzrok kvara, te su oko 2 % učinkovitiji u proizvodnji električne energije. Visoka cijena magneta i energetskih poluvodiča u konverteru dosad je bila ograničenje, ali ti se troškovi sada smanjuju. Niski troškovi proizvodnje kod velikih uređaja rezultirali su povećavanjem veličine vjetrogeneratora svake godine. Na primjer, u Njemačkoj se prosječna veličina povećala sa 950 kW u 1999. na 1,7 MW u 2004.

Električna energija proizvedena vjetrogeneratorom mijenja se proporcionalno brzini vjetra na treću potenciju. Dakle, uređaj veličine 3 MW s promjerom rotora 90 m proizvodio bi oko 2,5 MW s prosječnom brzinom vjetra koja prevladava u Škotskoj, ali manje od 1 MW s prosječnom brzinom vjetra u Londonu. Škotska, sa stajališta obnovljivih izvora, ima jedan od najboljih izvora energije vjetra u Europi.

Jedan od problema s vjetrom je njegova intermitentnost, zbog čega je potrebna druga rezervna

4.1 Onshore wind

A dominant technology has emerged for large wind turbines; those being installed today are almost all horizontal-axis three-bladed upwind turbines (upwind means the wind reaches the rotor before the tower). Earlier machines had a constant rotation speed, providing synchronous generation, but the power capture at different wind speeds is more efficient with variable speed generators, so most turbines today are variable speed with doubly fed induction generators.

Two main issues still need to be addressed for these turbines to become fully grid compliant. The first is the ability to provide frequency and voltage response for the system operator, which requires the turbines to run at part load to be able to step up output to achieve this. Since the wind turbine energy is so valuable compared with the fuel cost, which is nil, there is a desire on the part of the turbine operator not to comply with this requirement. This issue becomes more significant as the proportion of wind power grows. Secondly, at the time of a network fault, the wind turbine must be able to ride through the fault and continue generating without drawing significant reactive power. It might even be required to feed reactive power into the fault to help maintain the system voltage. Once the network has been restored, it needs to restore its active power output as quickly as possible. Full mechanical power is not available immediately after the fault has cleared, due to the blade position which may affect the system frequency if the penetration of the wind generation is high. Enabling the turbines to ride through faults is an issue being addressed but not yet solved.

Permanent magnet direct drive generators eliminate the gearbox, a common cause of failure, and are about 2 % more efficient in electricity generation. The high cost of the magnets and the power semiconductors in the converter has so far been a barrier, but these costs are now falling. Lower generating costs from large machines has resulted in the size of turbines increasing each year. For example in Germany, the average size has increased from 950 kW in 1999 to 1,7 MW in 2004.

The electrical energy generated by a wind turbine varies with the cube of the wind speed. Thus a 3 MW rated machine with 90 m rotor diameter would generate around 2,5 MW with the average wind speed prevailing in Scotland, but less than 1 MW with London's average wind speed. Scotland, from a renewable energy point of view, has one of the best wind resources in Europe.

One of the problems with wind is its intermittency, which requires other generation to provide backup.

produkcija. U Njemačkoj se predviđa pripadni trošak manji od 0,5 EURcent/kWh, ovisno o slučaju. Međutim, postavljanje većeg broja vjetrogeneratora zahtijeva i ojačavanje mreže, a taj trošak još nije precizno određen.

Eon netz upotrebljava trenutačnu izlaznu snagu svih svojih vjetroelektrana zajedno s vremenskom prognozom za predviđanje buduće izlazne snage, s 96-postotnom točnošću za 4 sata i 90-postotnom za dan unaprijed. Velike varijacije u energiji mogu se pojaviti tijekom kratkog vremenskog razdoblja, a čak i kada su predviđene, postoje problemi upravljanja. Izlazna snaga vjetroelektrana Eon netza 24. je prosinca 2004. pala s 6 024 MW na ispod 2 000 MW unutar samo 10 sati.

4.2 Vjetar na moru (offshore)

Kako vjetroelektrane postaju sve veće, pronalaženje prikladnih mjesta na kopnu bez velikih ekoloških problema postaje sve teže, što je jedan od pokretača napretka vjetroelektrana moru. U usporedbi s korištenjem vjetra na kopnu, vizualni utjecaj korištenja vjetra na moru na krajolik je manji, a buka, flikeri i gniježđenje ptica ne uzimaju se u obzir. Također nema problema s neprikladnom zemljom, kao što je treset. Međutim, mora se obratiti pažnja o utjecaju na morski svijet, uključujući ribu, a infrastrukturni troškovi su obično veći.

Krajem 2005., u cijelom svijetu bilo je ukupno 10 projekata na moru. Rani projekti bili su relativno maloga opsega, u plićacima ili zaklonjenim vodama. Nedavno dovršen Horns Rev projekt u danskim vodama najveći je projekt na moru u svijetu, s vjetrogeneratorima 80x2 MW. Od 587 MW u cijelom svijetu, sve u Europi, 124 MW nalazi se u vodama Velike Britanije, a North Hoyle i Scroby Sands su ušli u pogon s po 60 MW u 2004.

U Njemačkoj je do 2003. postavljeno 14,6 GW kapaciteta na kopnu, ali ništa na moru; do 2015. predviđa se rast na 26,2 GW na kopnu i 9,8 MW kapaciteta na moru. Zbog ujednačenijeg vjetra i manje turbulencija sa uzvisina i zgrada iskorištavanje postavljenog kapaciteta bolje je na moru. U Njemačkoj će do 2015. vjetar na moru činiti 27 % ukupnog kapaciteta u vjetroelektranama, ali će priskrbiti 42 % električne energije proizvedene vjetrom. Jedan od razloga takve razlike su veće prosječne brzine vjetra kod sjeverozapadne njemačke obale. Škotska bi također mogla dobiti visoku iskorištenost, ako se izgrade vjetroelektrane na njezinoj sjeverozapadnoj obali. Pristup na mrežu i oštriji morski okoliš, međutim, obeshrabrujući su faktori.

Visok jedinični trošak temelja i montaže za uređaje na moru doveo je do toga da je njihova prosječna veličina veća od kopnenih, s novom generacijom uređaja od

In Germany the cost of this is thought to be less than 0,5 EURcent/kWh, depending on the scenario. As more wind turbines are installed, however, the network will need to be reinforced and the cost of this has not yet been estimated accurately.

Eon netz uses the momentary power outputs of all its wind plants coupled with the weather forecasts to predict future power outputs, with a 96 % accuracy for 4 hrs and 90 % for a day ahead. Large power swings can occur over a short period of time and even if they are predicted they are not without control issues. On 24 December 2004, the wind power output for Eon netz fell from 6 024 MW to under 2 000 MW within just 10 hours.

4.2 Offshore wind

As wind farms become increasingly larger, finding suitable onshore sites with no strong environmental concerns becomes more problematic, which is one of the drivers for offshore wind farms. Compared with onshore, offshore wind's visual intrusion is less, noise, flicker and bird nesting are not issues, and there is no problem with sensitive land such as peat moorlands, although the impact on marine life including fish needs to be addressed and infrastructure costs are usually much higher.

Late in 2005, a total of 10 offshore projects were currently operational worldwide. The early projects were relatively small scale and in shallow or sheltered waters. The recently completed Horns Rev project in Danish waters is the largest offshore project in the world, with 80x2 MW turbines. Of the 587 MW worldwide, all in Europe, 124 MW is in UK waters, with North Hoyle and Scroby Sands each commissioning 60 MW in 2004.

In Germany, by 2003 there were 14,6 GW of installed onshore capacity but none offshore; by 2015 this is forecast to rise to 26,2 GW onshore and 9,8 MW offshore. Because of more uniform wind; less turbulence from hills and buildings, the utilisation of installed capacity is better offshore. In Germany by 2015, offshore wind will be 27 % of the total wind capacity in installed capacity but will provide 42 % of the electrical energy generated by wind. Part of this difference is the higher average wind speeds off the northwest German coast. Scotland may also see high utilisation if wind farms are ever built off its NW coast. Access to the grid and a harsher marine environment are, however, deterrents.

The high unit cost of foundations and installation for offshore machines has led to their average size being greater than onshore, with the new generation of 5 MW machines expected to be the norm by the

5 MW za koju se očekuje da će postati uobičajena veličina do kraja desetljeća. Osim veličine, druga ključna razlika je u tome da se gondole na moru obično izvodi, s pozitivnim zračnim pritiskom koji sprječava potencijalnu koroziju uzrokovanu prskanjem mora. Održavanje i popravak veći je problem na moru, budući da pristup za vrijeme olujnog vremena može biti otežan. Pored toga, postoje pitanja dostupnosti i troškova vezanih uz postavljanje potrebnih podvodnih kablova. Trendovi rasta proizvodnje iz vjetra opisani su potpunije u poglavlju 6. Europa je vodeća u razvoju korištenja energije vjetra na moru s 73 % ukupnog svjetskog kapaciteta u 2004.

4.3 Valovi i plima

U usporedbi s vjetrom, tehnologije valova i plime u svojim su počecima te se čak ne može ni sastaviti uži izbor konkurentnih tehnologija. Još ne postoji niti jedna dominantna tehnologija. Tek je mali broj prototipova spojen na mrežu, a prvi prototipovi većeg opsega očekuju se možda za dvije godine, s puštanjem u pogon prve farme možda tek 2010.

4.3.1 Valovi

Velika Britanija posjeduje oko pola ukupnog europskog potencijala za korištenje energije valova. Valovi najveće energije nalaze se na sjeverozapadnoj obali Škotske. Za maksimalno povećanje proizvodnje bilo bi idealno da su postrojenja za pretvorbu energije valova locirana otprilike 10 km od morske obale, ovisno o konfiguraciji morskoga dna. To bi omogućilo presretanje valova prije nego što se energija izgubi tijekom kretanja prema plićim vodama. Na toj su udaljenosti troškovi kablovskih priključaka i temeljenja viši, tako da će početni razvoj uređaja i elektrana vjerojatno biti bliže obali od onog potrebnog za optimalno pridobivanje energije.

Uređaje koji su trenutačno u stadiju razvoja karakteriziraju različiti načini preuzimanja energije valova. Tehnologija uključuje: oscilirajuće stupce vode koji pokreću oscilirajuće stupce zraka za pokretanje turbine, člankovite cilindre koji plutaju na valovima i međusobno se pomiču te time pumpaju fluid koji prolazi kroz turbinu, sustave kojima se valovi hvataju preko niske brane u akumulaciju i ispuštaju preko turbine, kao i fiksne usidrene plutače čije vertikalne oscilacije pokreću cijevne pumpe ili linearne generatore. Smanjenje troškova će postati značajno samo kada se pojavi određeni broj dominantnih tehnologija.

Uređaj poznat kao Pelarmis, koji koristi princip člankovitih cilindara, čini se da je općenito prihvaćen kao najnapredniji razvojni uređaj za korištenje energije valova. Prototip uređaja

end of the decade. Other than size, the other main difference is that offshore nacelles are typically climate controlled with positive air pressure to keep potentially corrosive sea spray out. Maintenance and repair is more of an issue offshore, since access in stormy weather can be difficult. Additionally, there are availability and cost issues surrounding the design and installations of the required submarine cables. Trends in the growth of wind generation are described more fully in Section 6. Europe, however, is leading the way in development, with 73 % of the world's total installed capacity in 2004.

4.3 Waves and tides

Compared with wind, wave and tidal technologies are in their infancy, and even a short list of competing technologies has yet to emerge. There is as yet no single dominant technology. Only a small number of scaled prototypes have been grid connected with the first full scale prototypes expected in perhaps 2 years time, with the first farm not due in service before perhaps 2010.

4.3.1 Wave

The UK has around half of Europe's total wave resources, with the waves of the greatest energy being situated off the northwestern coast of Scotland. To maximise output, wave energy conversion devices should ideally be located about 10 km offshore, depending on seabed configuration, to intercept waves before they dissipate energy in moving to shallower waters. Cable and mooring costs are higher at this distance so the early development of devices and farms is likely to be closer to shore than that required for optimum power capture.

Various ways of power take-off characterise the devices currently under development. Methods include oscillating water columns which excite oscillating air columns to drive a turbine; articulated cylinders which float and align themselves normal to the waves, which move the cylinders relative to each other which drive hydraulic fluid via an accumulator storage system into a turbine. There are devices where waves are concentrated into a low head capture chamber and exit via a turbine; and fixed moor buoys whose vertical oscillations drive a hose pump or a linear generator. Cost reduction will only become significant once a limited number of dominant technologies emerge.

A device known as Pelarmis, which uses the articulated cylinder principle, seems to be generally acknowledged as being the wave device which is the most advanced in the development process. A prototype device has been in the water off Orkney in northern Scotland and has generated electricity. An order has been signed for 3 units at 750 kW to be

stavljen je u more na obali kod Orkneya u sjevernoj Škotskoj, gdje je proizvodio električnu energiju. Zaključena je narudžba 3 takve jedinice od 750 kW za Portugal, gdje su financijski poticaji visoki.

4.3.2 Plimna struja

Plima i oseka rezultat su gravitacijskih sile između mora i primarnih astronomskih tijela u našem Sunčevom sustavu, a 95 % sile koja proizvodi plimu i oseku potječe od Sunca i Mjeseca. Magnituda plime ovisi o položaju Zemlje, Sunca i Mjeseca, njihovoj relativnoj udaljenosti u eliptičnim orbitama, geografskoj širini i ograničenjima uzrokovanim kopnenom masom. To je sve vrlo predvidljivo. U nedavnom je izvještaju Black and Veatch 2004. [7], naslovljenom Procjena energetskeg potencijala plimnih struja u Velikoj Britaniji, Europi i globalno, navedeno da ukupni zbroj resursa plimnih struja u Velikoj Britaniji iznosi 110 TWh/godišnje, a 22 TWh/godišnje moguće je iskoristiti.

Većina uređaja za plimnu struju trenutačno u razvoju koristi turbine kao mehanizme za proizvodnju energije. Postavljene su u smjeru struje na morskom dnu ili pričvršćene za plutajuće ili uronjene platforme. Uređaj poznat kao Tidal, koji koristi dvostruku turbinu na uronjenom krilu koje se okreće s okretanjem plimne struje, općenito se smatra da će najvjerojatnije biti komercijalno uspješan. Vjerojatno će se početni uređaji za energiju plime preprojektirati ili instalirati u mirnijim vodama, kako bi se spriječili nepovoljni učinci publiciteta uzrokovanog olujnim štetama.

Većina uređaja za plimnu energiju instaliranih diljem svijeta koristi plimne zapreke, kao na primjer 240 MW Rance projekt u Francuskoj. Budući da su najbolje lokacije često na osjetljivim područjima estuarija te da je prouzročena ekološka šteta po današnjim normama visoka, mala je vjerojatnost da će se u skoroj budućnosti nastaviti s ikakvim važnijim projektima plimnih zapreka u Velikoj Britaniji. Uređaji za iskorištavanje plimne struje mnogo su manje vizualno nametljivi, neki su uronjeni i ne vide se te ne uzrokuju oštećenje obale; svi trenutačni plimni uređaji u razvoju koriste plimnu struju.

Zajednički problem iskorištavanja valova i plime jest činjenica da je potrebno najmanje nekoliko stotina MW instaliranog kapaciteta kako bi se troškovi smanjili i postali isplativi, čak i sa znatnom potporom u obliku zelenog certifikata ili zajamčene tarife, dok se djelatnost ne razvije. Portugal ima 12-godišnju zajamčenu tarifu, povezanu s indeksom cijena za uređaje za energiju valova od 23,5 EURcenta/kWh za prvih 20 MW priključene snage, zbog čega stručnjaci za razvoj obnovljivih izvora tu EU državu smatraju najpoželjnijom. Osim toga, neke vlade

su opskrbljivane za Portugal, gdje je financijski poticaj visok.

4.3.2 Tidal stream

Tides are the result of gravitational forces between the seas and the primary astronomical bodies in our solar system, with 95 % of the forces generating tides coming from the sun and the moon. The magnitude of a tide depends on the alignment of the earth, sun and moon; their relative distances in elliptical orbits, latitude and restrictions caused by land mass. These are all very predictable. A recent report by Black and Veatch 2004 [7], entitled UK Europe and Global Tidal Stream Energy Resource Assessment, estimates the UK total tidal resource to be 110 TWh/yr, with 22 TWh/yr extractable.

Most of the tidal stream devices currently under development use a turbine as the power take off mechanism, set normal to the flow direction and mounted either on the seabed or suspended from a floating or submerged platform. A device known as Tidal, which uses twin turbines on a submerged wing that reverses with the tidal stream reverse, seems to be generally viewed as the most likely to be commercially successful. It is likely that initial tidal devices will be either over engineered or installed in calmer waters to prevent adverse public relations setbacks from storm damage.

Most of the tidal energy devices installed around the world use tidal barrages such as the 240 MW Rance project in France. Given that the best sites are often in sensitive estuary areas and that the environmental damage caused is high by today's standards, it is unlikely that any significant tidal barrage projects will go ahead in the UK in the foreseeable future. Tidal stream devices are much less visually intrusive, some are submerged and invisible, and do not cause shoreline damage; all of the current tidal devices being developed use tidal stream.

An issue common to both wave and tidal schemes is that they will require at least several hundred MW of installed capacity to drive costs down to be economical, even with a significant subsidy in the form of Green Certificate or Feed-In Tariff until the industry develops beyond this point. Portugal has an index-linked 12-year-guaranteed feed in tariff for wave devices of 23,5 EURcent/kWh for the first 20 MW of connected power, which has made this Member State of the EU the preferred one for developers. In addition, some governments are offering grants for developing work in an effort to best identify and develop technical solutions.

nude financijsku potporu za razvoj tih djelatnosti u nastojanju da se što bolje identificiraju i razviju tehnička rješenja.

4.4 Fotonaponske ćelije (PV)

Iako je fotonaponski efekt poznat od prvih opažanja koje je Edmund Becquerel napravio 1837., tek je 1980. nastala proizvodnja fotonaponskih ćelija, čija je većina globalne proizvodnje bila u panelima tiskanih silikonskih solarnih ćelija. Uspješne tvrtke za proizvodnju fotonaponskih ćelija smještene su u SAD-u, Europi i Japanu. Istraživanja su se bavila alternativnim materijalima. Solarne ćelije od bakar sulfida bile su promašaj. Slijedile su ćelije od amornog silicija, koji je bio uspješno primijenjen, ali se od 1990. smatra neodgovarajućim za tržišta električne energije. Rast tržišta, iako je iznosio 24 % godišnje, u realnim odnosima novca i megawata bio je spor. Isporuke diljem svijeta do 1997. nisu dosezale 100 MW. Od 1997. rast je dramatičan, 38 % godišnje od 2000. vođen visoko uspješnim programima potpora u Japanu i Njemačkoj, tako da su 2004. isporuke po prvi put premašile 1 GW. Više od 80 posto svjetskog tržišta je u Japanu i Njemačkoj, a te države također dominiraju i svjetskom proizvodnjom.

Kristalni silicij na monokristalnim ili multikristalnim pločicama je i dalje dominantna tehnologija. Tehnologije tankih slojeva bore se za položaj protiv masivne infrastrukture i uobičajenog načina proizvodnje silicija. Istraživanje uređaja treće generacije se nastavlja.

Tržište kristalnim silicijem podijeljeno je između monokristalnog i multikristalnog silicija, a prednost se daje multikristalnim pločicama, što je proizašlo iz niskih kapitalnih troškova po toni proizvodnje za multikristalnu izvedbu i jednostavnije tehnologije u usporedbi s monokristalnom izvedbom. Monokristalna izvedba, iako skuplja, daje višu učinkovitost koja se sada približava 20 % i održava svoju konkurentnost na razini sustava.

Stopa rasta proizvodnje fotonaponskih ćelija je 38 posto godišnje od 2000. 95 % tog tržišta opskrbljuje se kristalnim silicijskim PV modulima. Gotovo 80 % se primjenjuje u sustavima priključenima na mrežu, uglavnom kao sustavi postavljeni na krovovima sa snagom manjom od 10 kW kapaciteta. To je rezultat programa potpore u Njemačkoj i Japanu.

Velike elektrane predstavljaju rastući sektor unutar sustava povezanih na mrežu. Dok je tržište krovnim pločama dobro opremljeno komponentama, postoji posebna potreba za MW inverterima napona i drugim električnim uređajima za ovu rastuću upotrebu.

Korištenje autonomnih uređaja ne smije se zanemariti. U jednakoj se mjeri sastoji od industrijskih aplikacija

4.4 Photovoltaics (PV)

While the photovoltaic effect has been known since the first observations by Edmund Becquerel in 1837, it was not until 1980 that the PV industry had taken shape, with the bulk of global production in screen printed silicon solar cells and well funded PV production companies were established in the USA, Europe and Japan. Research was active in alternative materials. The copper sulphide solar cell was a failure. This was followed by amorphous silicon, which enjoyed some success in consumer products but by 1990 was thought not to be suitable for power markets. Market growth, while 24 % a year in real terms of cash and Megawatts (MW), was slow. Worldwide shipments did not reach 100 MW until 1997. Since 1997, growth has been dramatic, at 38 % pa since 2000, driven by highly successful subsidy programmes in Japan and Germany, so that in 2004 shipments exceed 1 GW for the first time. Over 80 % of the world market is in Japan and Germany, and these countries also dominate world production.

The dominant technology remains crystalline silicon on either monocrystalline or multicrystalline wafers. Thin film technologies struggle to make any impact against the massive infrastructure and proven nature of silicon manufacturing, although research, particularly in "third generation" devices, continues.

The crystalline silicon market is divided between mono and multicrystalline silicon, with a preference for multicrystalline wafers, which has arisen from the lower capital cost per tonne of ingot produced for the multicrystalline case and a lower level of technology compared to single crystal growth. The monocrystalline route, while being a more expensive wafer gives a higher efficiency now approaching 20 % which maintains its competitiveness at the system level.

Growth of PV has been at the rate of 38 % pa since 2000. Ninety-five percent of this market has been supplied with crystalline silicon PV modules. Nearly 80 % of the systems were supplied for on-grid applications, largely as rooftop mounted systems of less than 10 kW capacity. This has been driven by the nature of the subsidy programmes in Germany and Japan.

A growing sector within the grid-connected market is that of large power plants. While the rooftop market is well supplied with components, there is a need particularly for MW scale inverters and other electronic devices for this growing application.

The off-grid sector should not be ignored. This is made up almost equally of industrial application

za telekomunikacije, navigacijskih pomagala i praćenje vremena, te ruralnih elektrifikacija, uglavnom kao 40 W solarni sustavi. To je još uvijek veliko tržište, ali s relativno sporim rastom od oko 10 posto godišnje.

4.5 Biomasa

Biomasa je proces u kojem sirovi ili obrađeni biljni materijal oksidira, spaljuje se ili fermentira kako bi se izravno ili neizravno proizvela toplina. Biomasa može biti u obliku poljoprivrednih ostataka, drva, drvenjače, papirnatoг smeća, gradskog čvrstog otpada, energetskih nasada i metana prikupljenog iz skladišta otpada. Iako se biomasa smatra obnovljivom, ne primjenjuje se uvijek na održiv način. U ruralnim područjima drvo osigurava čak 65 posto ljudske potrebe za energijom.

Ukupna godišnja održiva upotreba prirodnih šumskih zemljišta za ogrjev u ruralnim komunalnim područjima iznosi 6 milijuna tona, ali posljedice sječe šuma već su vidljive, što znači da je održiva vrijednost očito premašena u nekim područjima. Drvo ispušta manje emisija NO_x i SO_x od fosilnih goriva, ali ipak može uzrokovati ozbiljne zdravstvene posljedice, pri čemu su emisije čestica ozbiljan problem.

Ako se brzorastući nasadi koriste kao gorivo, moraju se natjecati s djelatnostima za proizvodnju hrane. Stoga, to može biti skupo gorivo. Nasadi/plantaže zahtijevaju velika zemljišna područja, a pritisak za proizvodnjom hrane će se povećati.

Biomasa je drugi najveći obnovljiv izvor energije. U urbanim područjima bit će u obliku razvoja uporabe otpada kao goriva, što će se često povezivati s toplifikacijom područja u novim građevinskim zonama (promoviranima kroz prostorno planiranje i razvojem energetskih opskrbljivača), kako bi se formirali relativno veliki kogeneracijski sustavi. U ruralnim područjima prevladavat će biomasa za rasplinjavanje bazirana na energetskim nasadima; veličinu tih pogona ograničavaju troškovi prijevoza biomase i rastuća učinkovitost relativno malih pogona za dobivanje energije iz biomase. Također će doći do znatne uporabe generatora male snage, baziranih na izgaranju biomase. Procjene uporabe biomase su općenito nesigurne.

Specijalizirana primjena biomase uključuje miješanje otprilike 5 % biomase, npr. palminih koštica, u kotlovima na kruto gorivo u velikim termoelektranama na ugljen. U Velikoj Britaniji to uključuje potporu putem zelenih certifikata.

for telecommunications, navigation aids, weather monitoring and rural electrification mainly as 40 W solar home systems. This is still a large market but a relatively slow growing one at around 10 % pa.

4.5 Biomass

Biomass is the process whereby raw or processed plant material is oxidised, burnt or fermented to produce heat, either directly or indirectly. Biomass can be in the form of agricultural residues, wood, wood pulp, paper trash, municipal solid waste, energy crops and methane captured from landfill sites. Although biomass is considered renewable, it is not always applied in a sustainable way. In rural areas, wood provides as much as 65 % of man's energy needs.

The total annual sustainable use of natural woodlands in communal rural areas as firewood is about 6 million tons, but since deforestation is already evident, the sustainable value is obviously being exceeded in some areas. Wood releases fewer emissions of NO_x and SO_x than fossil fuels, but can still have a serious health impact, with particulate emissions being a serious issue.

If fast growing crops are cultivated as fuel, they must compete with food growing activities. They can, therefore, be an expensive fuel. Crops/ plantations require substantial land area and the pressure to produce food is going to increase.

Biomass makes up the second largest renewable energy source. In urban areas, this will be in the form of waste-fuelled developments, often allied to district heating schemes in new building projects (promoted through planning regulations and the development of energy service providers) to form relatively large CHP systems. In rural areas, gasification-based biomass generation fuelled by energy crops will predominate; the size of these plants will be restricted by the costs of transporting biomass and the increasing efficiency of relatively small biomass power plants. There will also be a significant presence of small-scale combustion-based biomass generators. Estimates of the penetration of biomass generally are uncertain.

A specialist application of biomass involves the blending of, say 5 % biomass, e.g. palm kernels, in pulverised fuel boilers in large coal-fired power stations. In the UK, this attracts subsidy payments through green certificates.

4.6 Sažetak tehnologija i mogućnosti

Čini se da će vjetar na kopnu (onshore) imati najveći udio u novoj električnoj energiji iz obnovljivih izvora priključenih na mrežu tijekom sljedećih 15 godina. Međutim, potkraj tog razdoblja, ograničenost raspoloživih lokacija i mreže će vjerojatno kočiti daljnji rast.

Vjetar na moru (offshore) još je na početku i opterećen s otprilike 40 % više kapitalnih troškova u usporedbi s vjetrom na kopnu, te također uz značajno više troškove održavanja. Vjerojatno će i mrežno povezivanje također biti značajno skuplje. Pripadni viši faktori iskoristivosti vjetrogeneratora na moru mogu donekle nadoknaditi dulje prekide rada zbog održavanja.

Tehnologije koje koriste valove i plimnu struju razvijaju se s raznolikim konkurentskim izvedbama. Većina testiranih modela ima manje od jedne četvrtine stvarnog opsega uređaja. Njihova je vrijednost ograničena zbog odsutnosti linearnosti u izvedbi projekta iz modela u pogon pune veličine. Realistični modeli stvarnog opsega rezultirali bi kapitalnim troškovima, što bi tu tehnologiju učinilo financijski neprivlačnom. Trenutačno se čini da će široko rasprostranjeni komercijalno uspješni projekti biti mogući tek za 10 godina.

Fotonaponske ćelije imaju mnoge specijalističke primjene, npr. u prestižnim zgradama i u udaljenim aplikacijama bez mreže. Međutim, njegov budući rast vjerojatno će biti golem, ali ograničen na otprilike manje od 10 % obujma proizvodnje iz obnovljivih izvora u idućih 15 godina.

Tehnologija proizvodnje biomase nešto je manje zahtjevna od drugih, ali mogli bi je ograničavati troškovi opskrbe gorivom i problemi isporuke, a razvoj nasada namijenjenih za biomasu mogao bi se sve više natjecati s proizvodnjom hrane.

4.6 Summary of technologies and prospects

It would appear that onshore wind will provide the greatest proportion of new renewable grid-connected power over the next 15 years. However, towards the end of that period, the availability of suitable sites and grid constraints are likely to inhibit further growth.

Offshore wind is still in its infancy and is burdened with perhaps 40 % higher capital cost compared with onshore wind and what are likely to be significantly higher maintenance costs. Grid connections are also likely to be significantly higher. The intrinsically higher utilisation factors of wind turbines offshore may be offset to some extent by longer maintenance outages.

Wave and tidal flow technologies are being developed with a variety of competing designs. Most of the models being tested are below one quarter full scale but their value is limited because of the absence of linearity in performance in projecting from model to full size. Realistic full-scale models would seem to yield capital costs which makes this technology financially unattractive. At present widespread commercially successful designs seem to be at least 10 years into the future.

Photovoltaics have many specialist applications e.g. in prestigious buildings and remote off-grid applications. Nevertheless, their future growth is likely to be spectacular but limited to perhaps less than 10 % of the renewable output in 15 years from now.

The technology of biomass generation is slightly less demanding than some but may well be limited by the cost of the availability of fuel supply and delivery issues where the development of purpose-grown biomass crops will increasingly compete with food production.

5 ISPLATIVOST PROIZVODNJE ENERGIJE IZ OBNOVLJIVIH IZVORA

Razmatranja u poglavljima 3 i 4 podrazumijevaju da je trenutačan trošak proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora općenito viši od troškova proizvodnje električne energije iz konvencionalnih izvora. Unatoč tom trenutačnom stanju, opasno je pretpostaviti da će se to nastaviti neodređeno dugo zbog sljedećih razloga:

- za proizvodnju energije iz ugljena, nafte i plina, trošak goriva je, a mogao bi i ostati, promjenjiv po većinom rastućoj krivulji,
- za nuklearnu proizvodnju nedavno je izgrađeno nekoliko novih elektrana u Europi i SAD-u te su stoga rezultirajući troškovi nesigurni,
- za svu morskou tehnologiju, uključujući valove, plimu i vjetar, kapitalni i troškovi održavanja nisu još dovoljno dokazani,
- za biomasu nesiguran je trošak i raspoloživost prikladnog goriva,
- EU shema trgovanja emisijama, uvedena 2005., imat će učinak na troškove termalne proizvodnje, ali za sada to još nije sigurno za dugoročno razdoblje i pripadajući troškovi ulaganja za smanjenje emisija ne potiču se još primjereno.

Unatoč tim nesigurnostima, slika 1 prikazuje relativne sadašnje troškove glavnih tehnologija prihvaćenih za proizvodnju električne energije koje će biti povezane u mrežu. U ovom su prikazu upotrijebljeni troškovi Velike Britanije. Zbog trenutačne cijene zelenog certifikata od otprilike 6,5 EURcent/kWh, jedino se vjetar na kopnu može sigurno natjecati na tržištu, na temelju uvjeta ekonomičnosti i uz današnje troškove tehnologija neobnovljivih izvora energije.

Unatoč očitim gospodarskim nedostacima i stoga troškova opskrbe krajnjih korisnika električne energije iz obnovljivih izvora, postoje druge jasne prednosti razvoja proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, koji nisu sadržane na slici 1, a uključuju:

- procijenjeno smanjenje emisija CO₂ u EU za 17 posto do 2020.,
- industriju koja bi u Europi zapošljavala 200 000 ljudi,
- upotrebu lokalnih resursa,
- procijenjenu uštedu od 115 milijardi eura u izbjegnutim troškovima za gorivo,
- povećanu raznolikost dostupnih goriva, što bi vodilo prema boljoj sigurnosti opskrbe.

5 THE ECONOMICS OF RENEWABLE GENERATION

The discussions in Sections 3 and 4 imply that at present the cost of electricity production from renewable sources is generally higher than conventional sources. Despite this being the case at present, it is dangerous to assume that this will remain the case indefinitely, for the following reasons:

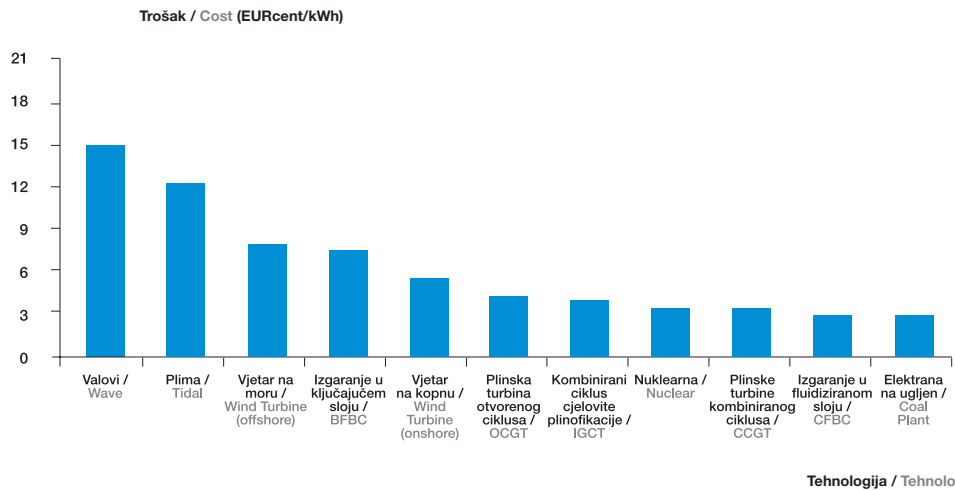
- for coal, oil and gas generation, the cost of fuel is and may continue to be volatile on a generally rising curve,
- for nuclear generation, few new plants have recently been built in Europe and the US and therefore outturn costs are uncertain,
- for all marine technology, including wave, tidal and offshore wind, capital and maintenance costs are not yet sufficiently proven,
- for biomass, the cost and availability of suitable fuel is uncertain,
- the EU emissions trading scheme, introduced in 2005, will have an effect on thermal generating costs but as yet this is uncertain in the long run and associated investment cost to reduce emissions is not yet properly incentivised.

Despite these uncertainties, Figure 1 shows the relative present-day costs of the main technologies adopted for generating electricity that will be grid connected. UK costs are used in this illustration. With the green certificate (ROC) currently trading at perhaps 6,5 EURcent/kWh, only onshore wind can be certain to compete favourably in the market purely on economical terms with today's costs of other non-renewable technologies.

Despite the apparent economic disadvantages and hence cost to the end user of renewable sources of electricity supply, there are other clear advantages in the development of renewable generation sources not included in Figure 1, which include the following:

- reduced CO₂ emissions estimated in the EU to be 17 % less by 2020,
- an industry employing 200 000 people in Europe,
- use of local resources,
- an estimated EUR 115 billion saved in avoided fuel costs,
- an increased diversity of the fuel mix leading to improved security of supply.

Slika 1
Trošak proizvodnje
različitih tehnologija
u Velikoj Britaniji
Figure 1
UK Cost of
generation by
various technologies



6 POSTIGNUĆA I PROCJENE

Poglavlje 4 opisuje potencijalnu sposobnost različitih tehnologija obnovljivih izvora u stvaranju značajnog doprinosa u proizvodnji električne energije, s izuzetkom hidroenergetike i geotermalne tehnologije. Proizvodnja energije iz vjetra napravila je najveći doprinos u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora do sada i vjerojatno će tako i nastaviti u kratkom i srednjem vremenskom roku. PV je pokazao najdramatičniju stopu rasta.

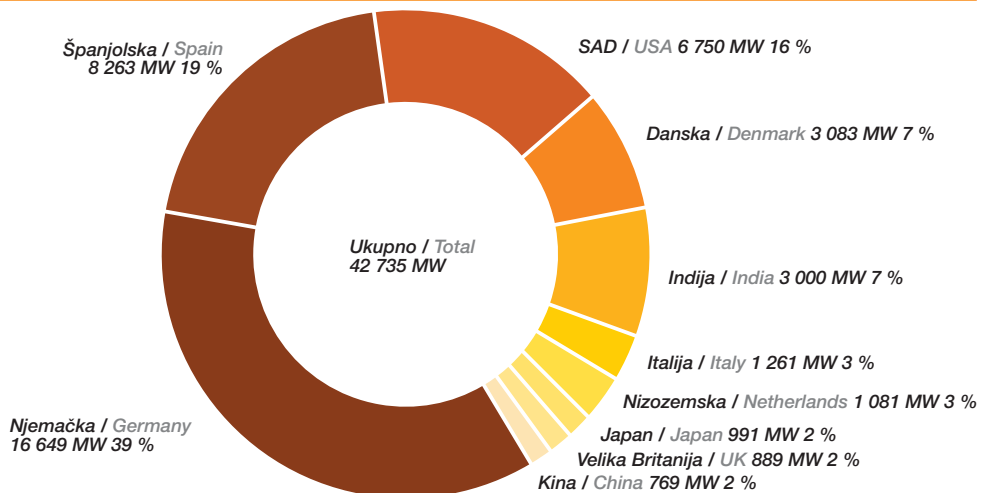
Slika 2 i tablica 6 prikazuju 10 glavnih tržišta energijom vjetra u svijetu za 2004. u smislu postotka u instaliranom kapacitetu za korištenje energije vjetra u svijetu, ali i u smislu instaliranih MW [8]. Tablica 6 također prikazuje stopu rasta za svaku vodeću državu u proizvodnji energije vjetra tijekom posljednjih godina. Iz slike 2 može se vidjeti da je 73 % svjetskog kapaciteta za korištenje energije vjetra instalirano u Europi, a Njemačka ostvaruje više od polovice tog iznosa.

6 ACHIEVEMENTS AND PROJECTIONS

Section 4 described the potential viability, with the exception of hydro and geothermal, for various renewable technologies to make significant contributions. Wind generation has made the biggest contribution to renewable generation to date and is likely to do so in the short and medium term. PV has shown the most dramatic rate of growth.

Figure 2 and Table 6 show the top 10 wind power markets in the world in 2004 in terms of the percentage of world wind power installed capacity and also in terms of MW installed [8]. Table 6 also shows the growth rate in each of the leading wind generation countries over recent years. From Figure 2 it can be seen that 73 % of the world's wind power capacity has been installed in Europe, with Germany providing more than half of the total.

Slika 2
Deset vodećih tržišta
energijom vjetra za
2004. po ukupnom
iznosu instaliranih MW
Figure 2
Top ten wind power
markets in 2004,
cumulative MW
installed

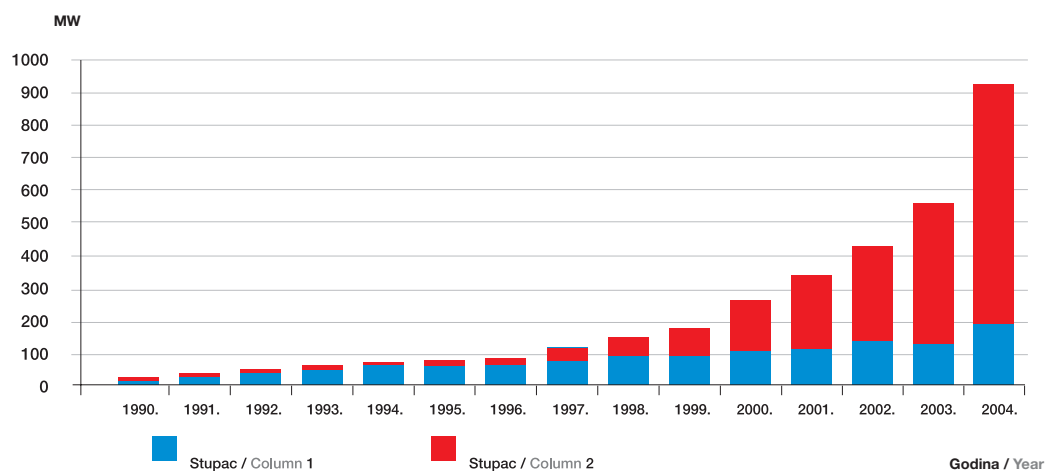


Tablica 6 - Ukupno instalirano (MW) u vodećih deset tržišta energijom vjetra
Table 6 - Cumulative installation (MW) in the top ten wind power markets

Država / Country	Ukupno instalirano kraj 2001. / Cumulative installed end 2001	Ukupno instalirano kraj 2002. / Cumulative installed end 2002	Ukupno instalirano kraj 2003. / Cumulative installed end 2003	Ukupno instalirano kraj 2004. / Cumulative installed end 2004	Stopa rasta 2003.-2004./ Growth rate 2003-2004 %	Trogodišnji prosjek / 3 years average %
Njemačka / Germany	8 734	11 968	14 612	16 649	13,9	24,0
Španjolska / Spain	3 550	5 043	6 420	8 263	28,7	32,5
SAD / USA	4 245	4 674	6 361	6 750	6,1	16,7
Danska / Denmark	2 456	2 880	3 076	3 083	0,2	7,9
Indija / India	1 456	1 702	2 125	3 000	41,2	27,3
Italija / Italy	700	806	922	1 261	36,7	21,7
Nizozemska / Netherlands	523	727	938	1 081	15,3	27,4
Japan / Japan	357	486	761	991	30,2	40,5
UK / UK	525	570	759	889	17,1	19,2
NR Kina / P. R. China	406	473	571	769	34,7	23,7
Ukupno deset / Total ten	22 952	29 329	36 545	42 735	16,9	23,0

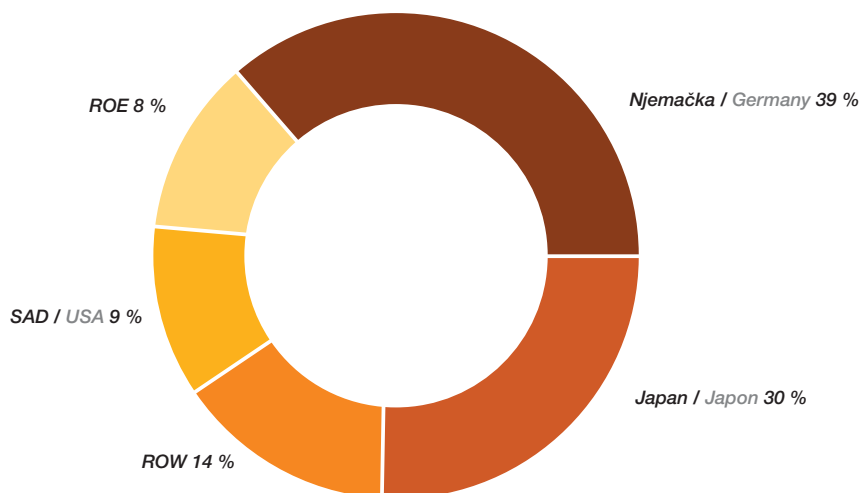
Slika 3 prikazuje stopu rasta PV, u stupcu 1 za autonomne uređaje i stupcu 2 za razvoj uređaja priključenih na mrežu, posljednjih godina. Slika 4 prikazuje analizu PV tržišta po državi i regiji [9].

Figure 3 indicates the rate of growth of both off-column 1 and on-column 2 grid PV development in recent years. Figure 4 shows the breakdown of the PV market by country and region [9].



Slika 3
Svjetsko PV tržište
1990.-2004.
Figure 3
World PV market
1990-2004

Slika 4
Svjetsko PV tržište
po državi i regiji,
2004
Figure 4
World PV market by
country and region,
2004



Razvoj obnovljivih izvora može se objasniti samo u smislu složenog skupa poticaja koji djeluju u svakoj državi. Oni uključuju:

- klimu i raspoloživost primarnog obnovljivog izvora energije,
- neiskorišteni potencijal primarnih obnovljivih izvora energije i raspoloživost odgovarajućih novčanih sredstava,
- raspoloživost tržišta i povjerenje,
- olakšavanje (ili slično) spajanja na mrežu,
- tarife i potpore,
- zasićenost tržišta.

Za ilustraciju, Njemačka, Španjolska i Danska, tri od četiri glavne države u razvoju proizvodnje električne energije iz vjetra, prihvatile su zajamčene tarife ili premije, raspolažu prikladnim novčanim sredstvima i imaju obilje vjetrovitih obalnih lokacija.

U redovitim razmacima Ernst & Young objavljuje takozvane Indekse privlačnosti država s obzirom na energiju iz obnovljivih izvora [10]. Uzimajući u obzir gore navedene poticaje, najnovije izdanje tog indeksa, u zimi 2006., prikazuje aktualni izračun vrijednosti (Tablica 7).

The development of renewables can only be explained in terms of a complex set of drivers at work in each country. These include the following:

- climate and the availability of the primary renewable energy sources,
- unexploited potential of primary renewable energy sources and the availability of appropriate finance,
- market availability and confidence,
- ease (or otherwise) of grid connections,
- tariffs and subsidies,
- market saturation.

To illustrate these drivers, Germany, Spain and Denmark, three of the top four countries for the development of wind generation, have all adopted feed-in tariffs or premiums, good availability of suitable finance and extensive windy coastal sites.

Ernst & Young publish at regular intervals so-called Renewable Energy Country Attractiveness Indices [10]. Taking into account the above drivers, the most recent edition of these indices, Winter 2006, shows the currently calculated values in Table 7.

Tablica 7 - Indeksi privlačnosti država s obzirom na energiju iz obnovljivih izvora : zima 2006.
Table 7 - Renewable energy country attractiveness indices: Winter 2006

Rang / Ranking		Država / Country	Indeks svih obnovljivih izvora / All Renewables Index	Indeks vjetra / Wind Index	Solarni Indeks / Solar Index	Indeks biomase i drugo / Biomass and Other Index	Indeks infrastrukture obnovljivih izvora / Renewables Infrastructure Index
Trenutačni / Current	Prijašnji / Previous						
1	(1)	Španjolska / Spain	69	69	69	61	79
2	(2)	SAD / USA	68	68	75	60	70
3	(4)	Njemačka / Germany	63	63	69	55	54
4	(3)	Velika Britanija / UK	61	62	44	57	61
5	(5)	Indija / India	58	60	55	45	64
6	(9)	Italija / Italy	57	58	57	49	60
7	(6)	Francuska / France	56	57	56	52	56
7	(6)	Portugal / Portugal	56	57	55	49	63
9	(9)	Nizozemska / Netherlands	55	57	49	42	57
9	(11)	Kina / China	55	58	42	28	57
9	(12)	Kanada / Canada	55	58	41	37	63
12	(6)	Irska / Ireland	54	57	37	45	64
13	(13)	Švedska / Sweden	51	51	43	53	51
13	(13)	Grčka / Greece	51	53	51	41	53
15	(15)	Australija / Australia	50	50	56	44	51
16	(15)	Danska / Denmark	49	50	43	45	58
16	(17)	Norveška / Norway	49	50	33	46	56
18	(18)	Belgija / Belgium	48	50	36	36	53
19	(19)	Finska / Finland	37	37	27	45	39
20	(20)	Austrija / Austria	31	28	47	45	46

Valja primijetiti da se prve tri države na tržištu energije vjetra prikazane na Tablici 6 ponovo pojavljuju kao prve tri na Tablici 7. Velika Britanija nalazi se na četvrtom mjestu na Tablici 7 uvelike zbog značajnog potencijala, dok je Danska na šesnaestom mjestu jer je realizirala većinu svog potencijala energije vjetra. Tablice 8 i 9 prikazuju aktualno stanje i procijenjeni rast u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora u Europi, podijeljen po tehnologijama i izražen u postocima ukupne proizvodnje električne energije u zemljama Europske unije 15 [11]. Podaci su također izraženi u odnosu na proizvodnju energije i prema instaliranom kapacitetu proizvodnje.

It is worth noting that the top three countries in the wind market, as shown in Table 6, appear again as the top three in Table 7. The UK is in fourth place in Table 7, largely because of significant potential, whereas Denmark is in 16th position, having realised most of its wind power potential. Tables 8 and 9 indicate current and projected growth in renewable electricity generation in Europe, broken down by technology and expressed as a percentage of total electricity production in the EU15 [11]. The figures are also expressed in terms of expected energy supply and installed generating capacity.

Tablica 8 - Doprinos obnovljivih izvora proizvodnji električne energije: TWh
Table 8 - Contribution of renewables to electricity generation: TWh

	1995. Stvarno / Actual	2000. Stvarno / Actual	2010. Procijenjeno / Projections	2020. Procijenjeno / Projections
Vjetar / Wind	4	22,4	168	444
Fotonaponske ćelije / Photovoltaic	0,03	0,1	3,6	42
Biomasa / Biomass	22,5	39,2	141	282
Hidroelektrane / Hydro	290,2	321,5	355,4	384
Geotermalni sustavi / Geothermal	3,5	4,8	7	14
UKUPNI OIE u zemljama EU 15 / Total RES in the EU 15	320,2	388	675	1 166
Ukupna proizvodnja električne energije (Trendovi do 2030. - EC) / Total Electricity Generation (Trends to 2030 - EC)	2 308,3	2 574	3 027	3 450
OIE udio / Share of RES (%)	13,9 %	15,1 %	22,3 %	33,8 %

Tablica 9 - Doprinos novim kapacitetima proizvodnje: GW
Table 9 - Contribution to new generation capacity: GW

	1995. - 2000.	2001. - 2010.	2011. - 2020.	2001. - 2020
Vjetar / Wind	10,3	62,2	105	167,2
Fotonaponske ćelije / Photovoltaic	0,06	3	32	35
Biomasa / Biomass	2,6	18,3	27	45,3
Hidroelektrane / Hydro	2,7	10,2	9	19,2
Geotermalni sustavi / Geothermal	0,14	0,3	1	1,3
UKUPNI OIE u zemljama EU 15 / TOTAL RES in the EU 15	15,8	94	174	268
Ukupna proizvodnja električne energije (Trendovi do 2030. - EC) / Total Electricity Generation (trends to 2030 - EC)	71,9	225	285	510
OIE udio / Share of RES (%)	22,0 %	41,8 %	61,0 %	52,5 %

7 ISKUSTVA S PROIZVODNjom IZ ENERGIJE VJETRA

S porastom kapaciteta za proizvodnju iz energije vjetra tijekom proteklih godina pojavili su se brojni tehnički problemi od kojih su neki bili neočekivani. Ti su problemi ili sputali razvoj korištenja energije vjetra ili stvorili moguću razinu zasićenja.

Podaci prikupljeni o koeficijentu korištenja snage vjetrogeneratora pokazuju vrijednost od 18 % za Njemačku i 21 % za Dansku, dok mnogo manja proizvodnja energije iz vjetra u Velikoj Britaniji pokazuje koeficijent od 23 %. Ove su brojke u

7 EXPERIENCE WITH WIND GENERATION

With the growth of wind generation capacity over recent years, a number of technical issues have emerged, some of which were unforeseen. These have either inhibited the growth of the development of wind power or constitute a possible level of saturation.

Data accumulated on capacity factor for wind generation indicate a value of 18 % for Germany and 21 % for Denmark, whilst the UK's much smaller wind industry has a capacity factor of 23 %.

skladu s različitim prosječnim brzinama vjetra u te tri države.

Također je otkriveno da su zbog svojstvene intermitentnosti vjetra sustavu potrebne znatne količine brzog pričuvnog energetske kapaciteta. Te se razine razlikuju ovisno o sustavu s kojim je postrojenje povezano, ali ukupni pripisivi troškovi vjetrogeneratora mogu se povećati i do 10 % kako bi se omogućila ovakva pričuva. U nekim je slučajevima proizvodnja vjetrogeneratora ograničena zbog nedovoljne konvencionalne proizvodnje u sustavu.

Studije stabilnosti sustava u Danskoj, Velikoj Britaniji i drugdje pokazale su da razina proizvodnje iz vjetra od oko 20 % ukupno angažiranih elektrana može predstavljati realnu granicu angažiranja vjetroelektrana, zbog stabilnosti sustava.

U Velikoj Britaniji, gdje postoji visoka gustoća naseljenosti i strogi građevinski propisi, vjetroelektrane moraju dobiti lokacijsku dozvolu, što može potrajati nekoliko godina, da bi nakon toga stale u red za priključak na mrežu. Ova dva procesa zajedno dovode do kašnjenja od preko 10 godina od prvog zahtjeva do početka izgradnje.

Drugdje u Europskoj uniji planiranje se ne čini toliko teškim, ali priključak na mrežu i dalje je ozbiljan problem. Konkretni problem koji navode proizvođači i dobavljači energije vjetra je da je njihov pristup mreži često ograničen i da su dogovori vezani za priključivanje katkad nepošteni. Nedovoljna razina razdvajanja vlasništva i djelovanja sustava štetna je i za tržišno natjecanje i za ciljeve održivosti. Proizvođači iz obnovljivih izvora energije također ističu potrebu za stabilnim okvirom potpora za njihove investicije radi jačanja vjerodostojnosti obveze država članica Europske unije prema obnovljivim izvorima energije i njihovog poticanog ulaganja.

8 INFRASTRUKTURNI ZAHTRAJEVI

Po svojoj naravi, veći dio proizvodnje energije iz obnovljivih izvora je distribuirana proizvodnja koja podrazumijeva veliki broj jedinica, s mnogo manjim kapacitetom od onih koje su donedavno obilježavale razvoj opskrbe električnom energijom. Većina proizvodnje energije iz obnovljivih izvora bit će prikupljena na naponima ispod 132 kV, a ne u sustavima od 400 kV koji su razvijeni da bi se zadovoljile potrebe priključaka velikih elektrana.

These figures are in accordance with the differing average wind speeds in the three countries.

It has also been found that due to the inherent intermittency of wind, significant amounts of fast response standby generating capacity are required on the system. These levels differ according to the system to which the plant is connected but the total attributable cost of wind generation may be increased by up to 10 % to allow for this phenomenon. In some cases, wind generation has been constrained off the system altogether due to the absence of sufficient conventional generation.

System stability studies in Denmark, UK and elsewhere have suggested that wind generation levels of about 20 % of the total connected plant may represent a practical limit to the penetration of wind generation due to system stability reasons.

In the UK, with high population densities and strict planning rules, wind farms must obtain planning permission, which may take several years before joining a grid connection "queue." These two processes together are leading to delays of over 10 years from the initial application before construction can begin.

Elsewhere in the EU, planning does not seem to be so onerous but grid connections remain a serious problem. Particular problems cited by producers and suppliers of wind power are that their access to the network has often been constrained and connection agreements have sometimes been regarded as unfair. An insufficient level of the unbundling of system ownership and operation are damaging both competition and sustainability objectives. Renewable producers also emphasise the need for a stable framework of support for their investments in order to build credibility of the EU Member States' commitment to renewables and their encouraged investment.

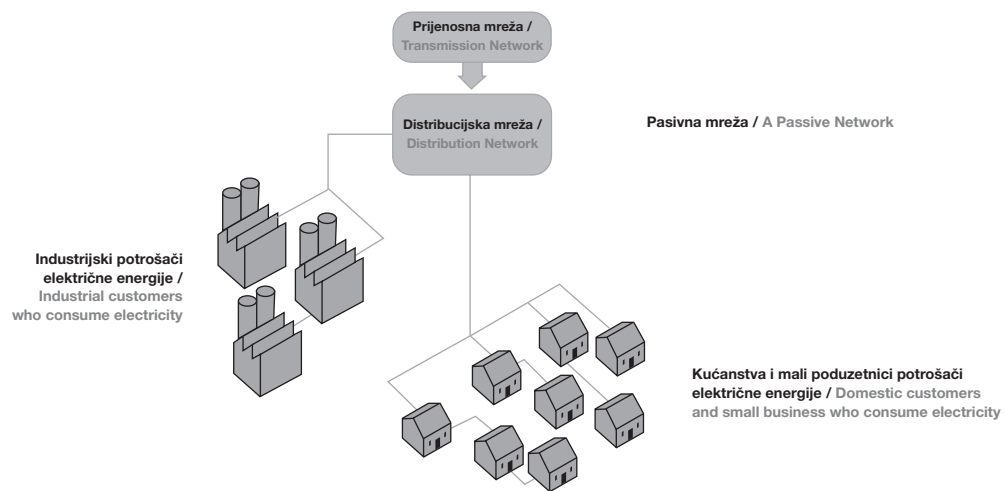
8 INFRASTRUCTURE REQUIREMENTS

Much of renewable generation is distributed generation, which implies a large number of units, much smaller in capacity than those which have characterised the development of electricity supply until recently. Most of the renewable generation will be collected at voltages operating below 132 kV rather than at 400 kV, which system has been developed to accommodate large grid connected generating stations.

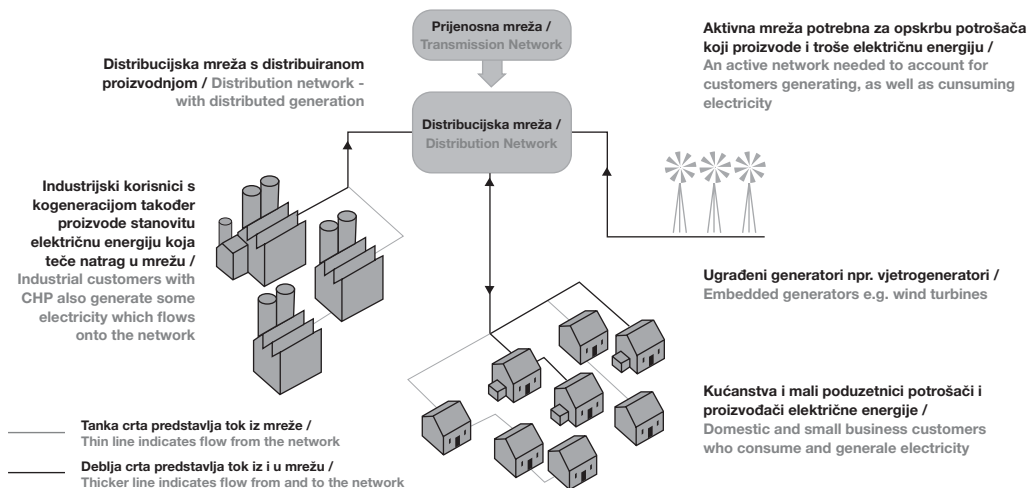
Distribucijski sustavi na koje se sada priključuju obnovljivi izvori energije, u prošlosti su bili pasivni sustavi opskrbe električnom energijom, kako to prikazuje slika 5. Energija se u potpunosti dobavljala iz mreže visokog napona, kroz jednu ili više razina transformacije. U budućnosti će, uvođenjem velikog broja uređaja za korištenje energije obnovljivih izvora povezanih s distribucijskom mrežom, strujni tokovi biti radikalno izmijenjeni, a vođenje distribucijskog sustava će zahtijevati potpuno novi pristup. Distribucijski sustav imat će sve više upravljačkih i radnih karakteristika mrežnih sustava s visokim naponom. Slika 6 prikazuje novu metodu rada budućih distribucijskih sustava ako je na njih priključena značajna distribuirana proizvodnja.

The distribution systems to which renewable generation is now being connected have in the past been passive electricity supply systems, as illustrated by Figure 5, with power fed entirely from the EHV grid through one or more levels of transformation. In the future, with the introduction of significant amounts of renewable sources connected to distribution systems, power flows will be radically altered and control of distribution systems will require a completely new approach, with distribution systems exhibiting more of the control and operation characteristics of EHV grid systems. Figure 6 shows the new basic method of operation of future distribution systems if significant distributed generation is connected to them.

Slika 5
Današnji sustavi distribucije električne energije
Figure 5
Today's power distribution system



Slika 6
Budući sustavi distribucije električne energije
Figure 6
Tomorrow's power distribution system



Iako su priključni naponi za pojedinačne male distribuirane generatore obično niski, skupine velikih vjetroelektrana i drugih obnovljivih izvora morat će se priključiti na viši napon, često u

Although connection voltages for individual small distributed generators tend to be low, groups of large wind farms and other renewable sources will often have to be connected at higher voltage in

udaljenim područjima. U Velikoj Britaniji, na primjer, najveći vjetrovi potencijal leži u sjevernoj Škotskoj, gdje su sadašnji mrežni priključci rijetki i gdje će biti potrebno značajno pojačanje mreže.

Izgradnja novih prijenosnih vodova od 400 kV diljem Europe, u svrhu prikupljanja značajnih količina proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, sigurno će naići na javne prigovore i projektantske poteškoće, kao i prateće zastoje.

Moguće je da će se, radi olakšavanja problema izgradnje, morati primijeniti revidirane sigurnosne norme za mrežne sustave, da bi se omogućilo priključivanje vjetroelektrana s niskim koeficijentom iskorištenja instalirane snage, kao alternativa izgradnji novih vodova. Ako se ovaj trend razvije, porast će koeficijent iskorištenja instalirane snage postojećih visokonaponskih vodova, zahtijevajući poboljšane tehnike nadzora i upravljanja koje će pomoći u održavanju cjelokupne sigurnosti opskrbe.

9 POLOŽAJ HRVATSKE

Zaštita okoliša prepoznata je kao važan element u djelovanju svih tvrtki unutar HEP grupe, ne samo u funkciji razvoja i strateškog planiranja nego i kao dio redovitog rada energetske postrojenja. Ovo je vjerovanje formalno izloženo u Planu poslovanja Uprave HEP-a za razdoblje 2004.-2008. i u radnim programima pojedinačnih tvrtki. Plan Uprave HEP-a obvezuje HEP grupu da djeluje na načelima ekonomičnosti i transparentnosti prema najvišim ekološkim standardima i da poboljša odnose s javnošću i kupcima. Ovaj Plan nastoji pojačati socijalnu uključenost HEP-a u procese reforme koji su u tijeku u Republici Hrvatskoj.

Promoviranje korištenja obnovljivih izvora energije, kogeneracijskih jedinica i čišćih i učinkovitijih tehnologija u proizvodnji, prijenosu i distribuciji električne energije, temeljna su načela ekološke politike HEP-a.

9.1 Protokol iz Kyota

Hrvatska planira ratificirati Protokol iz Kyota u prvom kvartalu 2007. i stoga poduzima mjere prije ratifikacije Protokola, u skladu sa svojom Strategijom zaštite okoliša i Nacionalnim planom djelovanja za okoliš, prema ispunjenju obveza u okviru Aneksa B Protokola iz Kyota.

Neriješeno pitanje vezano uz hrvatski zahtjev [12] za primjenu fleksibilnosti na temelju članka 4.6 Okvirne konvencije UN-a o promjeni klime (UNFCCC) i za povećanje ispuštanja stakleničkih

remote areas. In the UK, for example, the greatest wind potential lies in northern Scotland, where current grid connections are sparse and where significant grid reinforcement will be required.

The building of new 400 kV transmission circuits throughout Europe for the purpose of collecting significant amounts of renewable generation is certain to be faced with public objection, planning difficulties and attendant delays.

It may well be the case that to ease construction problems, revised security standards may have to be applied to grid systems to allow the connection of wind, with its low capacity factor, as an alternative to building new circuits. Should this trend develop, the load factor of existing high voltage circuits will rise, requiring improved monitoring and control techniques to help sustain the overall security of supply.

9 PROSPECTS FOR CROATIA

Environmental protection has been recognized as an important element in the operation of all the companies within the HEP Group, not only in the function of development and strategic planning but also as a part of the regular operation of power facilities. This belief has been formally outlined in the Business Plan of the Management Board of Hrvatska Elektroprivreda for the Period 2004-2008 and in Operating Programmes of individual companies. The Business Plan of HEP's Management Board commits the HEP Group to operate on the principles of cost effectiveness and transparency at the highest environmental standards and to improve public and customer relations. This Plan endeavours to intensify HEP's social involvement in the reform processes that are underway in the Republic of Croatia.

Promotion of the use of renewable energy sources, cogeneration units and cleaner and more efficient technologies in electricity generation, transmission and distribution are the basic principles of HEP's environmental policy.

9.1 The Kyoto Protocol

Croatia plans to ratify the Kyoto Protocol in the first quarter of 2007, and is therefore also taking measures prior to the ratification of the Protocol that are in line with its Environmental Protection Strategy and National Environmental Action Plan, towards the fulfillment of its commitments under Annex B to the Kyoto Protocol.

plinova u svojoj referentnoj godini za 4,46 milijuna tona CO₂-eq, što odgovara 14,6 posto, postalo je glavna prepreka planiranju, pripremi i donošenju gospodarskih odluka o novim investicijama i stranim ulaganjima u Hrvatskoj i pripremi plana raspodjele vezanog za uspostavu programa trgovanja emisijama u Hrvatskoj i njegove povezanosti s europskim programom trgovanja emisijama. Hrvatska se nalazi u procesu integracije u EU, a unutar tog procesa posebno se značenje pridaje provedbi UNFCCC-a i Protokola iz Kyota. Do kraja 2006. predviđeno je usvajanje nove Strategije i primjena Plana djelovanja za UNFCCC i Protokola iz Kyota, a u tom je kontekstu vrlo važno u 2006. završiti pregovore o hrvatskom pitanju.

S obzirom na smanjenje emisija stakleničkih plinova, u Hrvatskoj su poduzete neke konkretne mjere. Navodimo sljedeće:

- u 2003. s radom je započeo Fond za zaštitu okoliša i učinkovito korištenje energije Republike Hrvatske, financirajući se sredstvima prikupljenima iz naknada za emisije u zrak, naknada od korisnika okoliša, naknada za motorna vozila i naknada za otpad. Proračun Fonda za subvencioniranje projekata energetske učinkovitosti i obnovljivih izvora energije u 2004. iznosili su do 10,3 milijuna eura, a u razdoblju od 2005. do 2006. planiran je ukupan proračun od 77 milijuna eura,
- u 2006. započinje naplata naknada za emisije stakleničkih plinova elektranama,
- u pogon je stavljena prva vjetroelektrana od 6 MW i zaključeni su ugovori o otkupu električne energije iz vjetroelektrana snage 22 MW u izgradnji,
- izvršena je revitalizacija nekoliko hidroelektrana i time povećana njihova proizvodnja,
- započela je provedba brojnih manjih projekata energetske učinkovitosti i primjene obnovljivih izvora energije u industriji, javnom sektoru i poljoprivredi,
- započela je provedba dvaju velikih projekata koje sufinancira Globalni fond za zaštitu okoliša, uz pomoć Svjetske banke i UN-ovog Programa razvoja: Hrvatski projekt energetske učinkovitosti i projekt Uklanjanje prepreka za provedbu energetske učinkovitosti u uslužnom sektoru i sektoru domaćinstava. Ukupan pro-račun za ove projekte iznosi 43,5 milijuna američkih dolara,
- hrvatski Projekt energije iz obnovljivih izvora nalazi se u završnoj fazi pripreme i s proračunom od 13,4 milijuna američkih dolara potaknut će iskorištavanje biomase, energije vjetra i malih hidroelektrana,

The unsolved issue regarding the Croatian request [12] for the application of flexibility under Article 4.6 of the UN Framework Convention on Climate Change, and for an increase of greenhouse gas emissions in its base year by 4,46 million tCO₂-eq, corresponding to 14,6 %) has become a major obstacle to the economical planning, preparation and decision making on new investments and foreign investments in Croatia, and to the preparation of an allocation plan relating to the establishment of an emission trading scheme in Croatia and its connection with the EU emission trading scheme. Croatia is in the process of integration into the EU, and within this process special significance is given to the implementation of the UNFCCC and the Kyoto Protocol. By the end of 2006, the adoption of a new Strategy and Action Plan for the UNFCCC and the Kyoto Protocol implementation is envisaged, and in this context it is crucial to complete the negotiations on the Croatian issue in 2006.

In relation to the greenhouse gasses emissions reduction, some specific measures have recently been taken in Croatia, as follows:

- in 2003, the Environmental Protection and Energy Efficiency Fund (EPEEF) started operations with revenues from air emission charges, charges from environment users, motor vehicle charges and waste charges. The Fund's budget for subsidising energy efficiency and renewable energy sources projects in 2004 amounted to 10,3 million EUR, and in the period of 2005-2006 a total budget of 77 million EUR is planned,
- in 2006, application of the charge for greenhouse gas emissions to energy plants is starting,
- the first 6 MW wind power plant was put into operation and contracts for power purchasing from 22 MW plants under construction, have been concluded,
- the revitalisation of several hydro-power plants was carried out, thereby increasing their production,
- the implementation of a number of small energy efficiency projects, and the application of renewable energy sources in industry, the public sector and agriculture have begun,
- the implementation of two huge projects has begun, co-financed by GEF through the World Bank and the UNDP: Croatian Energy Efficiency Project, and Removing Barriers for the Implementation of Energy Efficiency in the Service and Household Sector. The total budget for these projects is 43,5 million USD,
- the Croatian Renewable Energy project is in its final stage of preparation and with a budget

- u okviru programa Europske komisije LIFE
 - Treće zemlje odobreno je sufinanciranje projekta Osposobljavanja za provedbu UNFCCC-a i Protokola iz Kyota, koji obuhvaća razvoj strategije klimatskih promjena, plan djelovanja, provedbene propise, katastar emisija, kapacitete za provedbu mehanizama u okviru Protokola iz Kyota i uvođenje programa edukacije i javnog promoviranja,
- s obzirom na emisije iz prometa, usvojena je Uredba o kvaliteti bioloških goriva, koja određuje nacionalni cilj od 5,75 % udjela biogoriva u ukupnoj količini goriva u 2010.

9.2 Zakonodavstvo i reforma energetike

Hrvatska provodi reformu energetskog sektora na načelima tržišnih odnosa i natjecanja u energetskom poslovanju. Od 2002. Hrvatska primjenjuje nove zakone koji upravljaju energetskim sektorom: Zakon o energiji, Zakon o regulaciji energetskih djelatnosti, Zakon o tržištu električne energije, Zakon o tržištu plina i Zakon o tržištu nafte i naftnih proizvoda. Ključne odrednice ovih zakona su:

- pristup energetskoj mreži kao regulirani pristup treće strane za sve pravne osobe kojima je Vijeće za regulaciju energetskih djelatnosti izdalo dozvolu za obavljanje energetske djelatnosti ili odobrilo status povlaštenog kupca,
- novi proizvodni kapaciteti mogu se izgraditi na temelju postupka javnog nadmetanja ili odobrenja,
- utemeljeno je Vijeće za regulaciju energetskih djelatnosti koje na području električne energije izdaje dozvole za energetske djelatnosti, osigurava funkcioniranje tržišta električne energije i nadzire ispunjavanje obveze javne usluge.

Direktiva 2003/54/EC koja regulira odnose na europskom tržištu električne energije stupila je na snagu u srpnju 2004. Određeni dijelovi energetskih zakona nisu bili u skladu s novom Direktivom i, osim toga, primijećeno je da brojne pravne odredbe nisu bile prikladne za provedbu promjena u energetskom sektoru, posebice odredbe Zakona o tržištu električne energije. Stoga je Hrvatski sabor donio Zakon kojim se mijenja Zakon o energiji, Zakon o tržištu električne energije i Zakon o regulaciji energetskih djelatnosti (Narodne novine, br. 177/2004). Najvažnije odredbe i novosti uvedene tim pravnim promjenama su [13]:

- of 13,4 million USD it should stimulate the utilisation of biomass, wind energy and small hydro-power plants,
- under the European Commission's LIFE-Third Country Programme, co-financing of the project Building Capacities for the Implementation of the UNFCCC and the Kyoto Protocol was granted, covering the development of a climate change strategy, action plan, implementation regulations, emission registry, capacities for the implementation of mechanisms under the Kyoto Protocol and the implementation of education and public promotion programmes,
- with regard to emissions from transport, the Regulation on Biofuel Quality was adopted, establishing the national target of a 5,75 % biofuel share in the total quantity of fuels in 2010.

9.2 Legislation and energy reform

Croatia has been implementing energy sector reform on the principles of market forces and competition in energy businesses. Since 2002, Croatia has applied new laws that govern the energy sector: the Energy Act, the Energy Activities Regulation Act, the Electricity Market Act, the Gas Market Act and the Oil and Oil Products Market Act. The key determinants of these laws are as follows:

- grid access is provided as regulated third party access (RTPA) for all legal entities issued a license to carry out an energy business or granted the status of an eligible customer by the Regulatory Council,
- new generating capacity can be built using the tendering or authorization procedure,
- the Croatian Energy Regulatory Council was established, which in the area of electricity issues licenses for electricity businesses, ensures the functioning of the electricity market and oversees the fulfillment of the public service obligation.

Directive 2003/54/EC, which governs the relationships in the EU electricity market went into force in July 2004. Certain parts of the energy laws were not consistent with the new directive and, in addition, it was noticed that numerous legal provisions were inappropriate for the implementation of changes in the energy sector, especially the provisions of the Electricity Market Act. Therefore, the Croatian Parliament passed the Act Amending the Energy Act, the Electricity Market Act and the Energy Activities Regulation Act (Official Gazette 177/2004). The most significant provisions and novelties introduced by these legal changes are as follows [13]:

- uvođenje TSO i DSO modela (operator prijenosnog sustava i operator distribucijskog sustava),
- osnivanje Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA) umjesto Vijeća za regulaciju energetske djelatnosti,
- određivanje tempa otvaranja tržišta električne energije u Hrvatskoj,
- regulirane energetske djelatnosti vrše se kao javna obveza, i to: proizvodnja električne energije za tarifne korisnike, prijenos električne energije, distribucija električne energije, opskrba tarifnih kupaca električnom energijom i organizacija tržišta električne energije.

Zakon o tržištu električne energije određuje tempo daljnjeg otvaranja tržišta električne energije.

Postavljena su sljedeća vremenska ograničenja:

- do 1. srpnja 2006., za kupce s potrošnjom većom od 9 GWh/god,
- do 1. srpnja 2007., za sve poslovne kupce,
- do 1. srpnja 2008., za sve kupce.

Zakon o tržištu električne energije pokreće zakonsku obvezu kupnje električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora na način da kvota ili minimalni obvezni udio obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije bude reguliran posebnom odlukom Vlade. Dakle, s jedne strane, poticajni fondovi potrebni za pokrivanje povećanih troškova proizvodnje iz pojedinih obnovljivih izvora naplaćivat će se od kupaca preko dobavljača i distribuirati povlaštenim proizvođačima (zajamčene tarife, proizvođačima iz obnovljivih izvora zajamčena je kupnja energije prema poznatim uvjetima) uz pomoć Hrvatskog operatora tržišta energije - HROTE. S druge strane, investicijski projekti obnovljivih izvora energije poticat će se namjenskim subvencijama Vlade i Fonda za zaštitu okoliša i učinkovito korištenje energije.

Za funkcionalno tržište električne energije u Hrvatskoj nužno je pripremiti prateće podzakonske akte. Oni koji su već doneseni jesu: Tarifni sustav za usluge elektroenergetskih djelatnosti koje se obavljaju kao javne usluge, Tarife za korištenje električne mreže, Tržišna pravila, Opći uvjeti isporuke električne energije, Pravilnik o naknadi za priključenje na mrežu i povećanje priključne snage, Mrežna pravila i Pravila mjerenja i obračuna utroška električne energije.

U pripremi su i drugi podzakonski akti, uključujući posebice Uredbu o minimalnom udjelu obnovljivih izvora energije, bez energije iz velikih hidroelektrana, Pravilnik o korištenju obnovljivih

- the introduction of TSO and DSO models (transmission system operator and distribution system operator),
- the establishment of the Croatian Energy Regulatory Agency (HERA) in place of the Energy Regulatory Council,
- the determination of the pace of the opening of the electricity market in Croatia,
- regulated energy activities are carried out as public services, namely: electricity generation for tariff customers, electricity transmission, electricity distribution, electricity supply for tariff customers and the organization of the electricity market.

The Electricity Market Act sets the pace for the further opening of the electricity market.

The following time limits have been set:

- by July 1, 2006 for customers with consumption above 9 GWh/a,
- by July 1, 2007 for customers in the commercial category,
- by July 1, 2008 for all customers.

The Electricity Market Act sets out the legal obligation to purchase electricity produced from RES in such a manner that a quota or minimum obligatory share of RES in electricity production is determined by a special government decision. Consequently, on the one hand, incentive funds needed to cover increased costs of production from individual RESs will be collected from customers through the supplier and distributed to privileged producers (feed in tariffs, purchase is guaranteed to RES producers on known terms) through the Croatian Electricity Market Operator - HROTE. On the other hand, RES investment projects will be encouraged by purpose-specific government subsidy and by the EPEEF.

For a functioning electricity market in Croatia it is necessary to have a full set of secondary legislative acts in place. The following have been passed: the Tariff System for Electricity Businesses Performed as Public Services, Tariffs for the Use of Electric Network, Market Rules, General Conditions of Electricity Supply, Rules on Charges for Network Connection and Increase in Connected Power, the Grid Code and the Electricity Metering and Billing Code.

In preparation are other secondary acts, including, in particular, the Regulation on the Minimum Share of Renewable Energy Sources Other than Large Hydro Power Plants, Use of Renewable Energy Sources Rules, and Conditions for Acquiring the Status of an Eligible Producer. After these acts are

izvora energije i Uvjeti za stjecanje statusa povlaštenog proizvođača. Nakon donošenja tih akata očekuje se da će do kraja 2006. godine HEP grupa početi poslovati u potpuno reguliranim uvjetima.

9.3 Razvoj proizvodnje energije iz obnovljivih izvora

Hrvatska se nalazi među prvih 10 europskih država s obzirom na udio električne energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji i postojećim kapacitetima. Hidroelektrane donose otprilike 50 posto ukupnog postojećeg proizvodnog kapaciteta i proizvodnje, ovisno o hidrološkim uvjetima (slike 7 i 8).

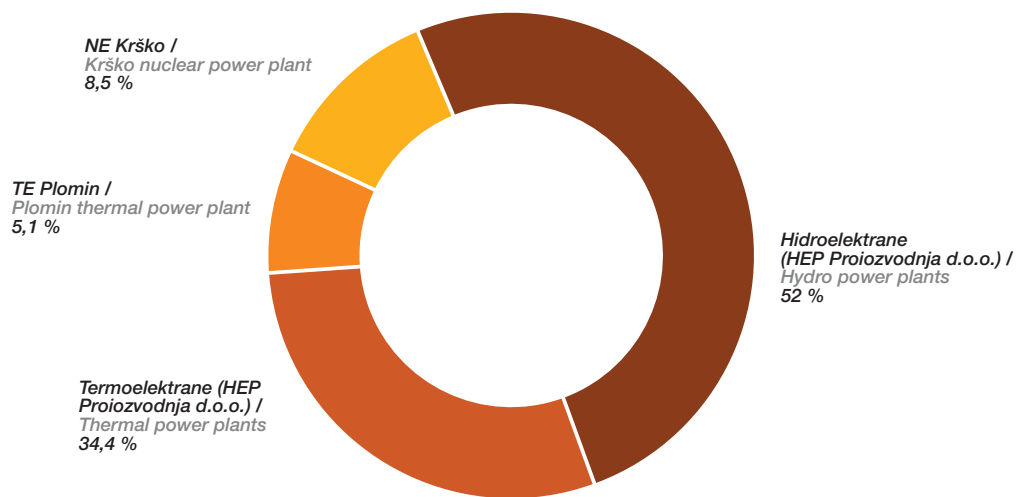
Najveći proizvođač energije iz obnovljivih izvora u Hrvatskoj je, dakako, Hrvatska elektroprivreda (HEP) koja vrši temeljne djelatnosti proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije i omogućuje funkcioniranje i obavlja nadzor hrvatskog elektroenergetskog sustava. Temeljne djelatnosti HEP-a ispunjavaju 95 % potreba za električnom energijom na teritoriju Hrvatske. Industrijske toplane i male privatne elektrane ispunjavaju preostale potrebe za električnom energijom. HEP opskrbljuje toplinom građane Zagreba, Osijeka i Siska te distribuira prirodni plin na području istočne Hrvatske.

passed, it is expected that before the end of 2006, the HEP Group will start to operate under fully regulated conditions.

9.3 Renewable energy development

Croatia is among the top 10 European countries in terms of the share of renewable electricity in total electricity production and installed capacity. Hydro power plants account for approximately 50 % of the total installed generation capacity and generation, depending on the hydrological conditions (Figures 7 and 8).

The biggest renewable energy producer in Croatia is naturally Hrvatska Elektroprivreda (HEP), which carries out the core activities of electricity generation, transmission and distribution, together with the operation and control of the Croatian power system. The core operations of HEP meet 95 % of the electricity demand throughout the territory of Croatia. Industrial cogeneration plants and small privately owned power plants meet the remaining electricity demand. HEP supplies heat to the citizens of Zagreb, Osijek and Sisak, and distributes natural gas in the region of eastern Croatia.



Slika 7
Raspoloživi kapacitet elektrana u Hrvatskoj
Figure 7
Available capacity of generating plants in Croatia

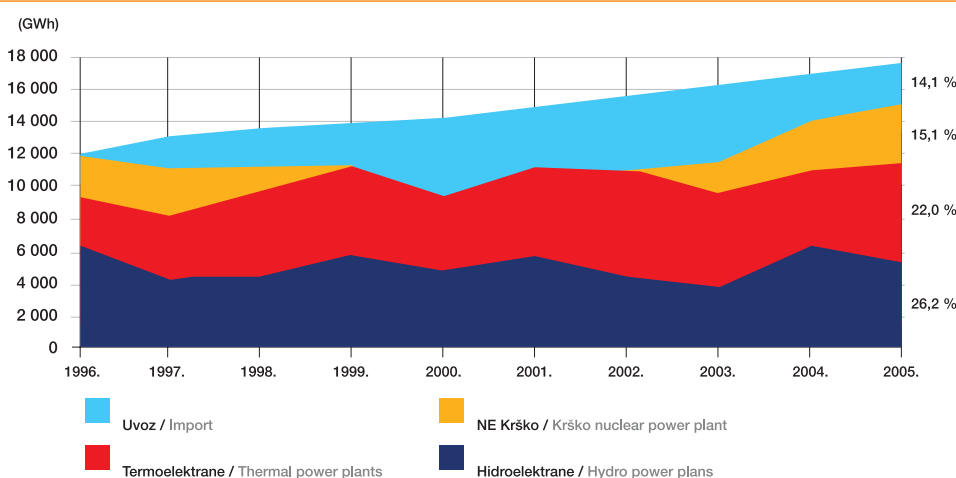
9.3.1 HEP-ova proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora

Iako čak i sada proizvodnja električne energije u hidroelektranama Hrvatske elektroprivrede pruža polovicu ukupne proizvedene električne energije, HEP nastoji povećati udio obnovljivih izvora energije. To će omogućiti smanjenje emisije stakleničkih plinova i ostalih zagađivača u zrak te će smanjiti korištenje neobnovljivih izvora, kao važan faktor održivog razvoja. Dvadeset pet hidroelektrana posluje unutar sustava HEP-a, njihov ukupan kapacitet iznosi 2 078 MW [14], a godišnja proizvodnja je između 4 i 7 TWh (slika 8).

9.3.1 HEP's power production from renewable energy sources

Although even now electricity generation by the hydroelectric power plants of Hrvatska Elektroprivreda accounts for up to a half of the total electricity generated, HEP is endeavouring to increase the share of renewable energy sources. This will bring about a reduction in greenhouse gas emissions and the emissions of other pollutants into the air and cut back on the use of non-renewable resources, an important factor in sustainable development. Twenty-five hydroelectric power plants are operating within HEP's system, with a total installed capacity of 2 078 MW [14] and annual production between 4 and 7 TWh (Figure 8).

Slika 8
Opskrba električnom energijom u Hrvatskoj
Figure 8
Electricity supply in Croatia



Sve hidroelektrane u vlasništvu HEP-a stekle su zelene certifikate za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora (slika 9). Time se HEP Proizvodnja d.o.o. svrstala među velike ovlaštene proizvođače energije iz obnovljivih izvora (zelene energije) u Europi. Dodjela certifikata i njihova periodična verifikacija vrši se prema TÜV standardu CMS-kriteriji za proizvodnju električne energije (CMS-Kriterien Erzeugung EE) za proizvođače energije iz obnovljivih izvora. Certifikacijski postupak za hidroelektrane vrši specijalizirana tvrtka koja provodi reviziju zaštite okoliša i primijenjene tehnologije, pregledavaju sustav evidentiranja proizvodnje energije, provjeravaju omjer prodane i proizvedene energije i ocjenjuju poslovnu organizaciju pojedinačnih proizvodnih postrojenja. Zahvaljujući zelenim certifikatima, hidroelektrane HEP-a su prepoznate kao najsuvremenija postrojenja koja udovoljavaju najboljoj međunarodnoj ekološkoj praksi. Ovi certifikati dokazuju da su hidroelektrane kvalitetno uklopljene u okolni krajolik i potiču daljnji razvoj i ulaganje u hidroelektrane kao najbolje

All the hydroelectric power plants owned by HEP have earned green certificates for electricity generation from renewables (Figure 9). This ranks HEP Proizvodnja d.o.o. (Power Generation) among the major accredited renewable energy (green energy) producers in Europe. The awarding of certificates and their periodical verification has been carried out pursuant to the TÜV standard CMS-Kriterien Erzeugung EE for the producers of energy from renewable sources. The certification procedure for hydroelectric power plants is carried out by a specialised company that audits the environment and technology applied, examines the energy generation recording system, checks the ratio of sold to generated energy and reviews the business organization of individual generating facilities. Thanks to green energy certificates, HEP's hydroelectric power plants have been recognized as state-of-the-art facilities complying with the best international environmental practices. These certificates prove that the hydroelectric plants have been fitted into the surrounding landscape in a quality manner and encourage further development and investment in hydroelectric power plants as the

predstavljani oblik proizvodnje zelene energije u Hrvatskoj.

Dodjela certifikata za proizvodne pogone predstavlja prvi korak prema prodaji električne energije na tržištu. Gotovo sve države Europske unije nude zelenu energiju kao konačni proizvod. Postoji sve veći broj kupaca koji se odlučuju na kupnju zelene energije i na taj način izražavaju svoju brigu za okoliš i potiču proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

Investiranje u rekonstrukciju i zamjenu opreme u hidroelektranama nastavlja se posljednjih godina. Smanjio se rizik ekološkog zagađenja turbinskim uljem, a mogućnosti proizvodnje električne energije su porasle. Ove je godine započeo novi projekt izgradnje hidroelektrane Lešće, koja će proizvoditi dodatnih 100 GWh na godinu čiste energije iz obnovljivog izvora u hrvatski sustav opskrbe električnom energijom. Ulazak elektrane u pogon se planira u 2008. Izgradnja ostalih novih hidroelektrana koje planira HEP prikazana je u tablici 10. Nažalost, postojeći hidroenergetski potencijal u Hrvatskoj je gotovo iscrpljen, posebno zbog nedavnog javnog otpora prema novim hidroelektranama na Dravi (HE Novo Virje).

best represented form of green energy generation in Croatia.

The certification of generation assets represents the first step towards selling electricity on the market. Nearly all the countries of the European Union have green energy as a final product. There is a continuously increasing number of customers who choose to buy green energy and in this way express their concern for the environment and encourage electricity generation from renewable sources.

Investments in the reconstruction and replacement of equipment in hydroelectric power plants have continued in recent years. The risk of environmental pollution by turbine oil was reduced and electricity generation capabilities increased. A new project for building a new hydro power plant in Lešće, that will add up to 100 GWh/a of clean and renewable electricity to Croatian power supply system, started this year and full operation is planned in 2008. The development of other new hydro power plants planned by HEP is shown in Table 10. Unfortunately, the existing hydro electricity potential in Croatia is practically exhausted, especially due to recent public resistance to new hydro power plants on the Drava River (HPP Novo Virje).



Slika 9
HEP-ovi zeleni certifikati za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora
Figure 9
HEP's green certificates for electricity generation from renewables

Tablica 10 - Nove hidroelektrane koje planira HEP
Table 10 - New hydro power plants planned by HEP

Hidroelektrana / Hydro Power Plant	Kapacitet / Capacity (MW)	Moguća proizvodnja / Possible output (GWh)	Investicija (u milijunima eura) / Investment (EUR million)	Najraniji datum dovršetka / Earliest Completion Date
HE Lešće / Lešće HPP	40	94	80	2008.
HE Podsused / Podsused HPP	43	215	150	2009.
HE Drenje / Drenje HPP	39	185	125	2011.

9.3.2 Kupnja električne energije iz obnovljivih izvora

Hrvatska elektroprivreda pokazuje pozitivan stav prema malim elektranama koje proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora. HEP kupuje, kao privremena mjera prije stupanja na snagu odgovarajućih podzakonitih akta o obnovljivim izvorima, proizvodnju električne energije od takvih izvora uz cijenu koji značajno prelazi HEP-ovu prosječnu cijenu proizvodnje električne energije. Na taj način Hrvatska elektroprivreda primjenjuje vlastitu ekološku politiku i pokazuje svoju predanost ispunjavanju državnih ekoloških prioriteta, posebice smanjenja emisije stakleničkih plinova u skladu s Protokolom iz Kyota, i prioriteta koji proizlaze iz nacionalne energetske strategije povezano uz promoviranje korištenja obnovljivih izvora energije.

Hrvatska elektroprivreda potiče provedbu nekoalicine pilot projekata, posebice onih koji koriste tehnologiju vjetra, deponijski plin, kogeneraciju električne energije i topline s biomasom kao primarnim gorivom te projekte koji koriste druge tehnologije (geotermalna i solarna energija).

Sedam vjetrogeneratora je pušteno u probni pogon krajem 2004. Vjetroelektrana se nalazi na brdu Ravne na Pagu. Ukupni postojeći kapacitet vjetroelektrane iznosi 5,95 MW, a njezina godišnja proizvodnja je približno 15 milijuna kWh električne energije. Investitor za prvu hrvatsku vjetroelektranu bio je privatni ulagač s kojim je HEP sklopio dugoročni ugovor o kupoprodaji električne energije. HEP će prodavati i distribuirati proizvedenu električnu energiju na tržištu. HEP-ovi stručnjaci su bili proaktivno uključeni u pripremu, izgradnju i puštanje u pogon vjetroelektrane.

Osim s paškom, isti je poslovni odnos uspostavljen s druge dvije vjetroelektrane - VE Trtar koja se nalazi u šibenskom zaleđu (11,90 MW ukupnoga instaliranog kapaciteta i 32,2 milijuna kWh godišnje proizvodnje u prosječnim uvjetima vjetra), i VE Jasenice smještene nedaleko Obrovca (10,80 MW i približno 20 milijuna kWh).

Što se tiče novih obnovljivih izvora (koji uključuju ne samo energiju vjetra, već također i biomasu, deponijski plin, geotermalnu i solarnu energiju), Hrvatska elektroprivreda je sklopila ugovor o preuzimanju električne energije od male termoelektrane Jakuševac koja koristi deponijski plin, ukupne snage 2 MW, smještene na odlagalištu otpada Jakuševac u Zagrebu.

9.3.2 Power purchasing from renewable energy sources

Hrvatska Elektroprivreda has an affirmative attitude towards small power plants that generate electricity from renewable sources. As a temporary measure before the appropriate secondary legislation for renewables goes into force, HEP is purchasing electricity generation from such sources for an amount significantly exceeding HEP's average electricity generation price. In this way, Hrvatska Elektroprivreda is implementing its environmental policy and demonstrating its commitment to meeting national environmental priorities, in particular the reduction of greenhouse gas emissions in line with the Kyoto Protocol, and the priorities stemming from the national energy strategy and relating to the promotion of the use of renewable energy sources.

Hrvatska Elektroprivreda encourages the implementation of several pilot projects, especially those applying the technology of wind, landfill gas, electricity and heat cogeneration with biomass as the primary fuel and projects using other technologies (geothermal and solar energy).

Seven wind turbines were placed into trial operation in late 2004. The wind park is located on the hill of Ravne on the island of Pag. The total installed capacity of the wind park is 5,95 MW, and its annual output is approximately 15 million kWh of electricity. The contractor for the first Croatian wind park was a private investor with whom HEP entered into a long-term power purchase agreement. HEP will sell and distribute generated electricity on the market. HEP's experts were proactively involved in the preparation, construction and commissioning of the wind park.

In addition to the Pag wind park, a similar business relation has been established with two other wind parks - WP Trtar situated in the hinterland of the town of Šibenik (11,90 MW total installed capacity and 32,2 million kWh annual output capability under average wind conditions), and WP Jasenice located in the surroundings of the town of Obrovac (10,80 MW and approximately 20 million kWh).

As for new renewable sources (which include not only wind power but also biomass, landfill gas, geothermal energy and solar energy), Hrvatska Elektroprivreda entered into an agreement on electricity takeover from the small landfill-gas-fired thermal power facility of Jakuševac, with a total output 2 MW, located at the Jakuševac waste disposal site in Zagreb.

10 ZAKLJUČAK

Opskrba električnom energijom u svijetu sada je usmjerena na uvođenje raznovrsnih proizvodnih tehnologija koje se općenito opisuju kao obnovljivi izvori energije. Temeljni razlog njihovog uvođenja i razvoja bio je neutralizirati porast emisije stakleničkih plinova nastalih proizvodnjom električne energije iz fosilnih goriva.

EU predstavlja izvrstan primjer načina na koji su se razvijale političke odluke za smanjenje ili barem obuzdavanje proizvodnje stakleničkih plinova u opskrbi električnom energijom. To se postiže postavljanjem ciljeva za zajednicu u cjelini, a zatim delegiranjem obveza državama članicama od kojih svaka ima različite postojeće kombinacije elektrane, karakteristike opterećenja, prirodna bogatstva i uredbe.

Postavljanje ciljeva za izvore koji su uvelike neekonomični zahtijeva odgovarajuće financijske poticaje. To je izuzetno važno jer bi bez potonjeg bilo nemoguće postići prvospomenuto. Niti jedna tehnologija koja se smatra ostvarivom još nije dosegla potpunu zrelost i još nije postala ekonomična u usporedbi s konvencionalnijim oblicima proizvodnje. Međutim, veliki napredak u razvoju vjetrogeneratora u smislu pouzdanosti, kvalitete i cijene znači da ovaj oblik proizvodnje više ne zahtijeva značajniju državnu novčanu pomoć. Ostaje vidjeti hoće li i ostale tehnologije napredovati na sličan način kao i energija vjetra na kopnu i hoće li se natjecati s drugim oblicima proizvodnje bez novčane pomoći. Povijest tehnološkog razvoja govori da će se neke od tehnologija koje su još u začetku nastaviti približavati tržištu samo ako odobreni kapital za njihov početni razvoj bude raspoloživ zajedno s tekućim novčanim potporama na osnovi kWh. Neki se snovi, međutim, možda nikada neće ostvariti.

Unatoč takvom spektakularnom razvoju korištenja energije vjetra na kopnu, pojavili su se određeni tehnički problemi poput: intermitentnosti proizvodnje, rada tijekom i nakon kvarova sustava te poteškoća u dobivanju odgovarajućeg pristupa mreži, no svi se ti problemi rješavaju. Kombinacija tih spornih pitanja, međutim, može predstavljati ograničenje za veličinu kapaciteta za korištenje energije vjetra koji će se moći uvesti u pojedini sustav.

Zajedno s ekološkim prednostima proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, sada je jasno da kako tehnologije obnovljivih izvora povećaju svoj udio, tako i pridonose poboljšanoj raznolikosti proizvodnje kombiniranjem s elektranama u sustavu s kojim su povezane. Iskorištavanje

10 CONCLUSION

The electricity supply industry worldwide is now set on a course of introducing a variety of generation technologies, which are described broadly as renewables. The original reason for their introduction and development was to help offset the rise in the production of greenhouse gases from electricity generation from fossil fuels.

The EU represents an excellent illustration of how political decisions to reduce or at least stem the production of greenhouse gases in the ESI have developed. This is being achieved by setting targets for the community as a whole and then by delegation to Member States who all have differing existing plant mixes, load characteristics, natural resources and regulations.

The setting of targets for sources which are largely uneconomical requires corresponding financial incentives. This is essential since without the latter it would be impossible to achieve the former. None of the technologies regarded as feasible have yet reached complete maturity and have not yet become economical when compared to more conventional forms of generation. Huge strides in the development of wind turbines in terms of reliability, rating and cost have, however, meant that this form of generation now requires little enforced subsidy. It remains to be seen whether all the other technologies will progress in a similar way to onshore wind and possibly compete with other forms of generation that are not subsidised. The history of technological development suggests that some of the embryonic technologies will only continue to move closer to market if capital grants for their initial development are available as well as ongoing subsidies on a kWh basis. Some dreams, however, may never be realised.

Despite such spectacular progress in the development of onshore wind making, technical problems such as the intermittency of output, performance during and after system faults, and difficulties in obtaining suitable grid access have all emerged but are being addressed. The combination of these issues, however, may represent a limit to the amount of wind generating capacity that can be introduced on each system.

Along with the environmental advantages of the renewable sources of electricity generation, it is now becoming apparent that as the renewable technologies increase their penetration, they are contributing to the improved diversity of the generation plant mixes on the system to which they are connected. The harnessing of local energy resources is also seen as advantageous. Despite

lokalnih energetskeg potencijala također se smatra korisnim. Unatoč nekim svojstvenim operativnim ograničenjima, nove tehnologije nude željeni doprinos raznolikosti energije u svijetu u kojem i dalje postoji neizvjesnost glavnih izvora energije.

Kao i s ostalim važnim etapama u razvoju opskrbe električnom energijom diljem svijeta, razvoj proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora testirat će domišljatost i snalažljivost inženjera i investitora. Napredak je neizbježan. Zakoni na području energije i okoliša donijeti u Republici Hrvatskoj približeni su europskom zakonodavstvu s ciljem integracije Republike Hrvatske u unutarnje europsko tržište električne energije i u samu Europsku uniju. To se također ogleda u razvoju zakonodavstva za korištenje obnovljivih izvora energije.

some inherent operational limitations, the new technologies offer a welcome contribution to energy diversity in a world where uncertainty remains concerning the principal sources of energy.

As with other notable stages in the development of electricity supply industries throughout the world, the development of renewable sources of electricity generation will test the ingenuity and resourcefulness of engineers and those willing to invest. Progress is inevitable. The laws in the field of energy and the environment enacted by the Republic of Croatia have been approximated to the European legislation in order for the Republic of Croatia to be integrated into the internal European electricity market and EU. This is also reflected in the development of legislation for the deployment of renewable energy sources.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] IAE - Međunarodna organizacija za energiju, World Energy Outlook, 2005.
- [2] Direktiva Europske unije, 2001/77/EC
- [3] Direktiva Europske unije, 1996/92/EC
- [4] Direktiva Europske unije, 2003/54/EC
- [5] Komisija Europskih zajednica, Izvješće o napretku u stvaranju unutarnjeg tržišta prirodnog plina i električne energije (Report on Progress in Creating the Internal Gas and Electricity Market), 2005.
- [6] Komisija Europskih zajednica, Tehnički aneks Izvora 5
- [7] Procjena izvora energije plime i oseke Ujedinjenog Kraljevstva, Europe i svijeta, Izvješće korporacije Black i Veatch, 2004.
- [8] GWEC - Globalno vijeće za energiju vjetra, Wind Force 12, 2005.
- [9] Centar za novu i obnovljivu energiju (NaREC) Unutarnje izvješće, TM Bruton, 2005., Pregled tržišta fotonaponskih sustava
- [10] Indeksi privlačnosti država s obzirom na obnovljivu energiju, Ernst & Young, 2006.
- [11] EREC - Europsko vijeće za obnovljive izvore energije, Tablice obnovljivih izvora energije za Europu, 20% do 2020., 2004.
- [12] Bijela knjiga hrvatske Vlade: Razina emisija za referentnu godinu za Hrvatsku na temelju članka 4., odlomak 6 UNFCCC, FCCC/SBI/2006/MISC.1
- [13] Zakon kojim se mijenja Zakon o energiji, Zakon o tržištu električne energije i Zakon o regulaciji energetske djelatnosti, Narodne novine, br. 177/2004., Zagreb, 2004.
- [14] EP i okoliš 2003.-2004., Hrvatska elektroprivreda d.d., Zagreb, 2006.

Uredništvo primilo rukopis:
2006-06-07

Manuscript received on:
2006-06-07

Prihvaćeno:
2006-06-14

Accepted on:
2006-06-14

NEKONVENCIONALNI MJERNI PRETVARAČI UNCONVENTIONAL MEASURING TRANSDUCERS

Krunoslav Bičanić, dipl. ing., ZG-Projekt d.o.o.,
Đorđićeva 24, 10000 Zagreb, Hrvatska

Doc. dr. sc. Igor Kuzle, prof. dr. sc. Tomislav Tomiša, Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Krunoslav Bičanić, dipl.ing. ZG-Projekt d.o.o., Đorđićeva 24, 10000 Zagreb, Croatia,

Assistant Prof Igor Kuzle, PhD, Prof Tomislav Tomiša, PhD,

University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing,

Unska 3, 10000 Zagreb, Croatia

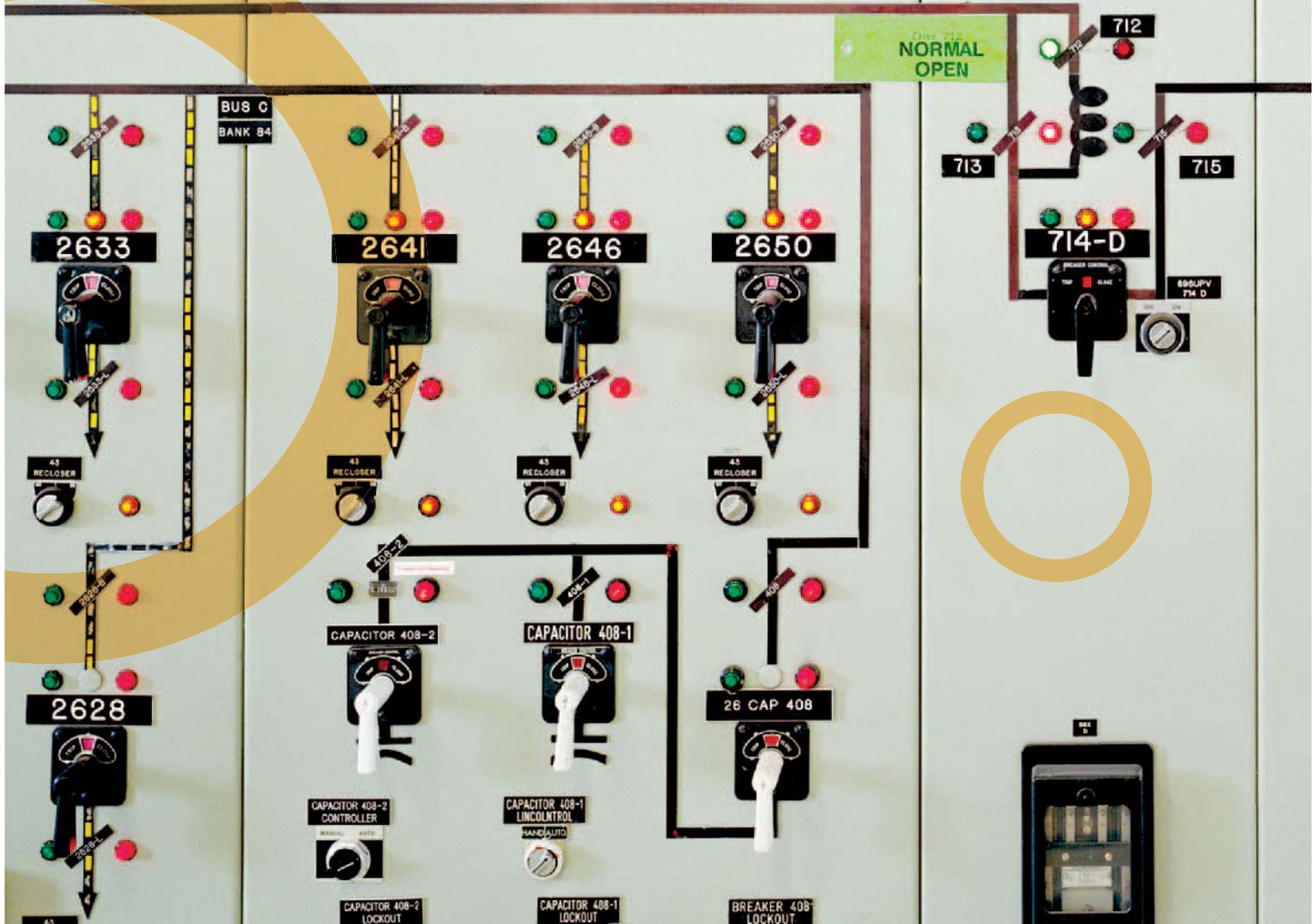
U elektroenergetskim postrojenjima većinu naponskih i strujnih mjernih pretvarača čine naponski, odnosno strujni mjerni transformatori s feromagnetskom (željeznom) jezgrom (konvencionalni mjerni pretvarači). Napredak tehnologije omogućio je razvoj i uporabu drukčijih vrsta mjernih pretvarača bez feromagnetske jezgre ili uz uporabu drugih feritnih materijala koji imaju velike prednosti (nekonvencionalni mjerni pretvarači). U radu je predstavljena teorija nekonvencionalnih načina pretvorbe mjernih signala napona, odnosno struje, te najvažnija obilježja nekonvencionalnih mjernih pretvarača. Nekonvencionalni mjerni pretvarači imaju brojne prednosti pred mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom: jeftiniji su, smanjeni su troškovi i pojednostavljena je njihova ugradnja, postižu veliku točnost u mjerenjima, manjih su dimenzija i imaju manju masu.

In electric power transmission systems most voltage and current measuring transducers are conventional high-voltage and current measuring transformers with a ferromagnetic (iron) core (conventional measuring transducers). Progress in technology has made possible the development and usage of different kind of measuring transducers without ferromagnetic cores or with other ferrite materials that have many significant advances (unconventional measuring transducers). This essay shows the theory of unconventional methods of measuring voltage and current signals and the most important characteristics of unconventional measuring transducers.

Unconventional measuring transducers have numerous advantages over conventional measuring transformers with ferromagnetic cores: they are affordable, installation costs are reduced, installation is easier and faster, they achieve high accuracy, and have smaller volume and mass.

Ključne riječi: djelitelj napona, Halova sonda, kombinirani transformator, naponski optički mjerni pretvarač, nekonvencionalni mjerni pretvarač, Rogovski svitak, strujni optički mjerni pretvarač

Key words: combined transformer, current optical measuring transducer, Hall probe, Rogowski coil, unconventional measuring transducer, voltage divider, voltage optical measuring transducer



1 UVOD

U elektroenergetskim postrojenjima većinu naponskih i strujnih mjernih pretvarača za prilagođivanje mjerne veličine čine naponski, odnosno strujni mjerni transformatori s feromagnetskom (željeznom) jezgrom koji se u praksi nazivaju konvencionalnim mjernim pretvaračima. Konstrukcija i načini izrade konvencionalnih naponskih i strujnih mjernih transformatora dosegli su svoj maksimum i nisu se znatnije mijenjali u posljednjih nekoliko desetljeća. Pri tome sve više dolazi do izražaja nekompatibilnost između suvremenih elektroničkih mjernih instrumenata i uređaja relejne zaštite s postojećim rješenjima strujnih i naponskih mjernih transformatora. Zbog toga je potrebna ugradnja mjernih međutransformatora kojima se mjereni ulazni signali snižavaju na razinu prikladnu za rad elektroničkih sklopova, što za posljedicu ima povećane troškove mjernog sustava i smanjenje njegove točnosti.

Napredak tehnologije omogućio je razvoj i uporabu drukčijih vrsta mjernih pretvarača - bez feromagnetske jezgre - ili uporabu (umjesto standardne željezne jezgre) drugih feritnih materijala koji imaju bolji odziv na brze promjene mjernih signala. U praksi se takvi mjerni pretvarači nazivaju nekonvencionalnim mjernim pretvaračima.

Kao popratni dio sustava nekonvencionalnih mjernih pretvarača redovito se ugrađuju elektronički sklopovi koji su često integrirani u same mjerne pretvarače [1] (njihova velika prednost prema konvencionalnim rješenjima). Na taj se način ostvaruje potpuna kompatibilnost s digitalnim mjernim uređajima koji su sve zastupljeniji u sustavima mjerne i zaštitne tehnike jer omogućuju veliku fleksibilnost glede broja i vrsta funkcija koje se pomoću njih mogu ostvariti.

1 INTRODUCTION

In electric power transmission systems most voltage and current measuring transducers used for adjusting measured values are voltage and current measuring transformers with a ferromagnetic (iron) core. These iron core transformers are often called conventional measuring transducers. The construction and production of conventional voltage and current measuring transformers have reached their maximum and have not changed significantly over the past decades. Incompatibility between modern electronic measuring instruments and relay protection devices with existing solutions of current and voltage measuring transformers is becoming more evident. There is always a need for auxiliary measuring transformers, which lower input signals to the level required for electronic devices to work. This increases the measuring system's costs and lowers its accuracy.

Developments in science and technology have made possible the use of other kinds of measuring transducers without ferromagnetic cores or with other ferrite materials because they have a better response to rapid signal changes. Such transducers are usually called unconventional measuring transducers.

Electronic circuits are regularly integrated into the transducers themselves as an appendix to unconventional measurement systems. In that way full compatibility with digital measurement devices is ensured (that is the biggest advantage over conventional measuring systems). These devices are more frequent in measurement and protective systems because they enable greater flexibility concerning the number and kind of functions.

2 MJERNI PRETVARAČI

Kako bi spomenuti sustavi uopće ispravno radili, potrebno im je osigurati što je moguće čišću sliku mjerne veličine. Zbog uporabe elektroničkih sklopova koji rade na niskim naponima, najčešće do 12 V, potrebno je smanjiti mjernu veličinu na iznos prikladan za mjerenje. Tijekom pretvorbe mjerne veličine na pogrešku mjerenja najviše utječu sljedeći čimbenici:

- klimatski utjecaji (temperatura, vlaga itd.),
- elektromagnetski utjecaji okolnih elemenata u postrojenju,
- fizikalne osobine materijala upotrijebljenih u konstrukciji samog pretvarača.

Za mjerenje napona u praksi se sve češće rabe otpornički, kapacitivni i kompenzirani (*RC*) djelitelji [2], naponski optički mjerni pretvarači [3], [4], [5], [6], a za mjerenje struje shuntovi (tj. pad napona na otporniku) [7], strujni optički mjerni pretvarači [8], Hall sonde [9] i di/dt pretvarači (Rogowsky svici) [2]. Često se, zbog težnje prema jednostavnosti i kompaktnosti, izrađuju kombinirani mjerni pretvarači koji u sebi ujedinjuju elemente za mjerenje napona i struje. Nekonvencionalni mjerni pretvarači imaju brojne prednosti prema mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom. Najvažnije prednosti (osim kod pretvarača koji u konstrukciji sadrže feritne materijale) su što nema:

- učinka histereze,
- zasićenja magnetskog polja pri velikim strujama,
- učinka ferorezonancije koja uzrokuje termičko preopterećenje - što najčešće ima za posljedicu uništenje naponskih mjernih transformatora.

Općenito, moderni pretvarači mogu se podijeliti na:

- hibridne - temeljene na poznatim i već rabljenim mjernim postupcima i metodama,
- optičke - temeljene na promjenama optičkih obilježja pojedinih kristala i drugih materijala u magnetskom i električnom polju. Kod tih pretvarača mjerenje struje temelji se na djelovanju magnetskog polja na kut polarizacije svjetlosti, a mjerenje napona temelji se na djelovanju električnog polja na promjenu polarizacije svjetlosti iz linearno polarizirane u eliptički polariziranu svjetlost.

2 MEASURING TRANSDUCERS

To make possible the proper usage of the systems mentioned above, it is necessary to ensure as clean an image as possible of the measurement values. Because of the use of low voltage electronic circuits, usually up to 12 V, it is necessary to reduce the unit of measurement to one that is appropriate. Factors affecting measured values during the transformation process are:

- climatic influence (temperature, moisture, etc.),
- electromagnetic influences of other elements present at the power plant,
- physical characteristics of materials used in the construction of the transducer.

For measuring voltages, in practice the following are more and more frequently used: resistive, capacitive and compensated (*RC*) voltage dividers [2], current shunts [7], voltage optical measuring transducers [3], [4], [5], [6], current optical measuring transducers [8], Hall probes [9] and di/dt transducers [2]. The necessity for simplicity has often led to making combined measuring transducers which unify the elements for measuring both - voltage and current. Unconventional measuring transducers have significant advantages over measuring transformers with a ferromagnetic core. The most significant advantages are: (expect to those made with ferrite material):

- no effect of hysteresis,
- no saturation of the magnetic core at high currents,
- no ferroresonance which causes thermal overload having as an effect the destruction of voltage measuring transformers.

In general, modern transducers can be divided into two groups:

- hybrid - based on already known and used measurement procedures and methods,
- optical - based on the impact which magnetic and electrical fields have on the optical features of certain crystals and similar materials. Current measurements are based on the impact of a magnetic field on the angle of light polarization in the case of transducers, while voltage measurement is based on the impact of the electric field on the change of polarization from linear polarized to elliptic polarized light.

3 NAPONSKI MJERNI PRETVARAČI

3.1 Otpornički, kapacitivni i kompenzirani (RC) djelitelji napona

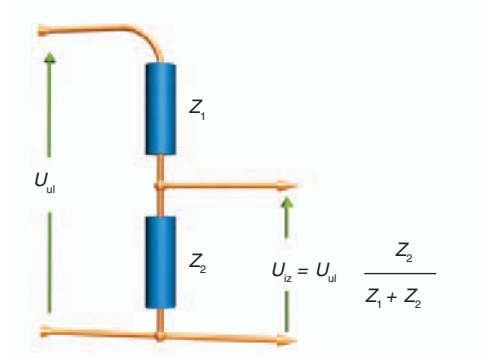
Pri mjerenjima niskih i srednjih napona u rasponu 24 V do 24 kV za prilagođivanje mjernog signala napona upotrebljavaju se mjerni pretvarači temeljeni na mjerenju pada napona na impedanciji, tzv. djelitelji napona (slika 1). Načelo rada djelitelja napona izvedeno je iz temeljnog Ohmova zakona [2], [7] i [10].

3 VOLTAGE MEASURING TRANSDUCERS

3.1 Resistive, capacitive and compensated (RC) voltage dividers

When measuring low and middle voltages in the range from 24 V to 24 kV, transducers are used for adjusting the measuring voltage signal, based on measuring the fall in voltage on impedance. These transducers are called voltage dividers (Figure 1). The basic principle of a voltage divider is deduced from basic Ohm's law [2], [7] and [10].

Slika 1
Djelitelj napona
Figure 1
Voltage divider



$$I = \frac{U_{ul}}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

$$U_{iz} = I \cdot Z_2 \quad (2)$$

$$U_{iz} = U_{ul} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

Za mjerenja na niskom i dijelom na srednjem naponu, do 10 kV, sinusoidalnog valnog oblika relativno niske frekvencije, redovito se upotrebljavaju tzv. otpornički djelitelji napona. Oni se izrađuju od otporne žice malog temperaturnog koeficijenta, kako njihov otpor ne bi ovisio o temperaturi okoline i struji opterećenja. Kod predmetnih djelitelja imaginarna je sastavnica zanemariva i ne utječe na valni oblik i mjernu veličinu.

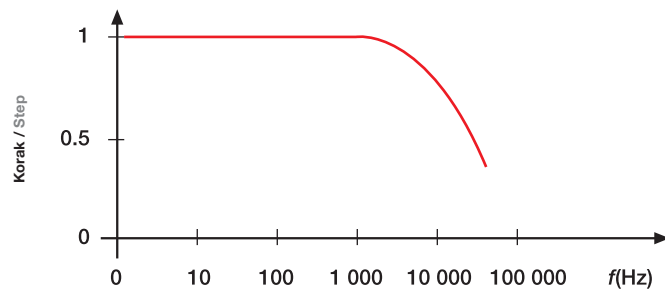
Za mjerenje napona iznad 110 kV upotrebljavaju se kapacitivni djelitelji napona (kapacitivni naponski transformatori), zbog većih izolacijskih naprezanja koje podnose kondenzatori i većih potrebnih razmaka između vodljivih površina.

Najistaknutija osobina otporničkih djelitelja napona je frekvencijsko područje koje se proteže od 0 do 3 kHz (slika 2).

For measuring sinusoidal wave form with relatively low frequency at low and partially at medium voltage, up to 10 kV, so called resistive voltage dividers are regularly used. They are made of resistive wire with a small temperature coefficient, so their resistance does not depend on the environmental temperature or the current load. The imaginary component of these dividers can be ignored and it does not affect the waveform and measured value.

For measuring voltage above 110 kV, capacitive voltage dividers are used (capacitive voltage transformers) because of the higher isolation exertions withstandable by condensers and the greater distance needed between conductive areas.

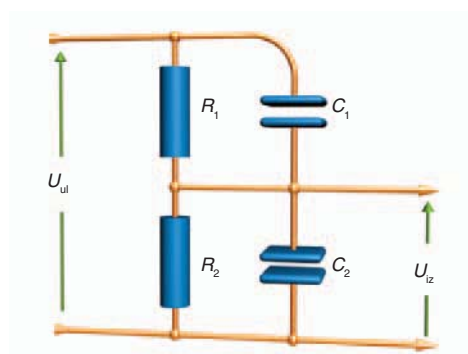
The most significant feature of resistive voltage dividers is their frequency range which spans from 0 to 3 kHz (Figure 2).



Slika 2
Frekencijska karakteristika otporničkog djelitelja napona
Figure 2
Frequency characteristic of resistive voltage divider

Na slici 2 zorno se uočava da relativno niska granična frekvencija otporničkog djelitelja napona ograničava mjerenje napona visokih frekvencija i vjerno prikazivanje valnih oblika sa strmim bridovima na njihovu izlazu. Zbog toga se za mjerenje nesinusoidalnih, ali i sinusoidalnih valnih oblika većih frekvencija, iznad 3 kHz, u paralelu otporima dodaju kondenzatori za kompenzaciju [11]. Takvi se djelitelji nazivaju kompenzirani (*RC*) djelitelji napona (slika 3).

From Figure 2 it is clearly visible that the relatively low end frequency of a resistive voltage divider limits the measuring of voltage of high frequency and also limits the correct showing of waveforms with sharp edges on their exit. Because of this, in order to measure nonsinusoidal but also sinusoidal wave forms of high frequency, above 3 kHz, condensers are added in parallel to the resistors for compensation [11]. These dividers are called compensated (*RC*) voltage dividers (Figure 3).



Slika 3
Kompenzirani (*RC*) djelitelj napona
Figure 3
Compensated (*RC*) voltage divider

Predmetni djelitelji imaju ograničenu gornju graničnu frekvenciju, određenu paralelnim spojem *R* i *C* komponentata. Djelitelj u tom slučaju mora zadovoljavati uvjet:

This divider has a limited upper borderline frequency which is determined by the parallel connection of *R* and *C* components. In this case the divider should satisfy this condition:

$$T_g = R_1 \cdot C_1 = R_2 \cdot C_2 \quad (4)$$

gdje je $T_g = 1/f_g$ vremenska konstanta *RC* kombinacije djelitelja napona, a f_g gornja granična frekvencija.

where $T_g = 1/f_g$ is the time constant of the *RC* combination of voltage divider, and f_g is the upper borderline frequency.

Ta vrsta mjernih pretvarača može bez oštećenja podnijeti velika naponska opterećenja. To u praksi znači da otpor takvih pretvarača mora biti

This type of measuring transducer can endure significant voltage loads without damage. In practice this means that the resistance of these transducers

jako velik. Posljedica toga je da struja u manjem iznosu teče kroz djelatnu komponentu ukupne impedancije, a uglavnom teče kroz parazitne kapacitete, nastale kao rezultat konstrukcije otpornika. Jalova komponenta struje uzrokuje znatan fazni pomak koji nastaje pri pretvorbi i koji se najčešće kompenzira kalibriranjem u elektroničkim sklopovima koji obrađuju te signale.

Točnost djelitelja napona ovisi o:

- temperaturnom koeficijentu otpora (i kondenzatora kod kompenziranih djelitelja),
- naponskom koeficijentu promjene otpora,
- parazitnom kapacitetu otpora,
- elektromagnetskom utjecaju susjednih faza.

Bez posebnih uvjeta, u praksi se postižu točnosti od najmanje $\pm 0,5\%$, a uporabom odgovarajućih materijala i temperaturne kompenzacije postižu se točnosti od $\pm 0,1\%$ u području temperatura od -40°C do 120°C . Najbolje je točnost odrediti mjerenjem. Dokazano je da se u praksi postižu točnosti od $\pm 0,04\%$ pri naponima od 175% nazivne vrijednosti [12]. Djelitelji napona imaju sljedeće prednosti pred naponskim mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom:

- velika linearnost u širokom rasponu frekvencija,
- niska cijena i jednostavnost izrade,
- male dimenzije i mala masa,
- nema zasićenja i učinka ferorezonancije.

3.2 Naponski optički mjerni pretvarači

Naponski optički mjerni pretvarači polagano preuzimaju svjetsko tržište zbog svojih prednosti pred naponskim transformatorima s feromagnetskom jezgrom. Na tržištu su se probili ponajprije zbog niže cijene, smanjene mase i jednostavnosti ugradnje. Primjerice, naponski optički mjerni pretvarač proizvođača ALSTOM [4] ima visinu od $7,3\text{ m}$ i masu od samo 230 kg , a upotrebljava se za mjerenje napona do 800 kV (ispitni napon $2\ 100\text{ kV}$). Osim toga, relativno jednostavno ga se može pretvoriti u strujni, ili čak kombinirani mjerni pretvarač zamjenom mjerne glave.

Ta vrsta pretvarača temelji svoj rad na promjeni linearno polarizirane svjetlosti u eliptično polariziranu svjetlost [3], u dvolomnim kristalima pod djelovanjem električnog polja. Električno polje stvara razliku potencijala, koja nastaje zbog fazne razlike dva polarizirana vala koji su međusobno fazno pomaknuti i čije su polarizacijske ravnine međusobno okomite. Opisana pojava u fizici se naziva Pockelsovim efektom, a upotrijebljivi su kristali Pockelsove ćelije. Kristali koji se upotrebljavaju ne smiju biti centralno simetrični.

Kao osjetilne ćelije rabe se kristali litij-kalcij-aluminij-heksafluorida (LiCAF), litij-stroncij-alumi-

ni should be very high. As a consequence the current runs to a lesser degree through the active component of total impedance, but mostly runs through parasitic capacitance which originates as a result of resistor construction. The reactive current component causes significant phase shift which originates during the transformation and which is most frequently compensated by calibrating in the electronic circuits that process these signals.

The accuracy of voltage dividers depends on:

- temperature coefficient of the resistor (and condenser when compensator dividers are used),
- voltage coefficient of resistance changes,
- parasitic capacitance of resistance,
- electromagnetic influence of neighboring phases.

Without special conditions, an accuracy of at least $\pm 0,5\%$ is achieved, while the use of certain materials and temperature compensation make possible an accuracy of $\pm 0,1\%$ in temperatures ranging from -40°C to 120°C . Measuring is the best way to determine accuracy. Practice has shown that an accuracy of $\pm 0,04\%$ can be achieved at 175% nominal voltage value [12]. Voltage dividers have significant advantages when compared to voltage measuring transformers with ferromagnetic cores:

- high linearity in a wide frequency range,
- low price and simplicity of construction,
- small dimensions and mass,
- no saturation and ferroresonance effect.

3.2 Voltage optical measuring transducers

Voltage optical measuring transducers are slowly taking over the world market because of their advantages when compared to voltage transformers with a ferromagnetic core. They are highly valued because of their lower price, smaller mass and simplicity of installation. For instance an optical voltage transducer made by the ALSTOM [4] company has a height of $7,3\text{ m}$ and mass of only 230 kg , and is used for measuring voltages up to 800 kV (its test voltage is $2\ 100\text{ kV}$). Apart from that, it is relatively easy to transform it to a current or even combined measuring transducer by simply changing the measuring head.

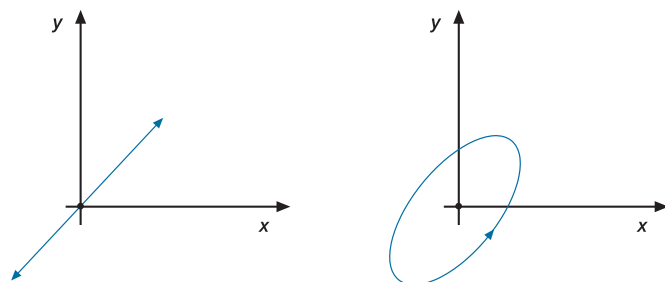
The working of this kind of transducer is based on changing linear polarized light to elliptic polarized light [3] in birefringence crystals when placed in an electrical field. This electrical field makes potential difference. It originates because of the phase difference of two polarized waves which are phase-shifted and whose polarization planes are perpendicular. This phenomenon is called Pockel's effect, while the systems of crystals which are used are called Pockel's cells. The crystals used must not be centrally symmetrical.

nij-heksafluorid (LiSAF), bizmut-silicij oksid (BSO), bizmut-germanij oksid (BGO) i sl. Kristali su relativno malih dimenzija, volumena reda veličine nekoliko kubičnih centimetara [13].

Pockelsove ćelije mogu se upotrebljavati u transversalnoj konfiguraciji (tzv. frekvencijski modulatori) ili longitudinalnoj konfiguraciji (tzv. amplitudni modulatori). Kod transversalne konfiguracije svjetlosni je snop okomit na smjer vektora električnog polja, a kod longitudinalne konfiguracije smjer svjetlosnog snopa podudara se sa smjerom vektora električnog polja. U praksi se češće upotrebljavaju Pockelsove ćelije u longitudinalnoj konfiguraciji. Promjenjivo polje u kojem se nalazi kristal uzrokuje promjene jakosti efekta čija je posljedica nastanak dvaju valova koji su međusobno okomito polarizirani i međusobno su pomaknuti u fazi. Taj pomak na kraju kristala uzrokuje promjene u eliptičnosti. Promjena eliptične polarizacije svjetlosti očituje se kao promjena u intenzitetu na izlazu iz kristala i prolasku kroz analizator (slika 4).

Crystals of lithium-calcium-aluminium-hexafluoride (LiCAF), lithium-strontium-aluminium-hexafluoride (LiSAF), lithium-silicat oxide (BSO), bismuth-germanium oxide (BGO) and others are used as sensing cells. Their dimensions are relatively small, sizes of a few cubical centimeters in volume [13].

Pockel's cells can be used in transversal configuration (so-called frequency modulators) or longitudinal configuration (so-called amplitude modulators). When used in transversal configuration the light beam is perpendicular to the electrical field vector, while in the case of longitudinal configuration the light beam is parallel to the electrical field vector. Pockel's cells are more often used in a longitudinal configuration. A changeable field which contains a crystal causes the changes in the strength of the effect whose consequence is the appearance of two waves which are perpendicularly polarized and phase-shifted. This distortion causes elliptical changes. This change of elliptic polarization of light is manifested as a change in intensity at its exit from the crystal and passing through the analyzer (Figure 4).



Slika 4
Linearno polarizirana zraka koja ulazi u kristal nakon prolaska kroz polarizator (lijevo) i eliptično polarizirana zraka nakon prolaska kroz kristal (desno) Figure 4
Linearly polarized light beam entering crystal after passing through polarizer (left) and elliptically polarized beam exiting crystal (right)

Napon koji stvara električno polje između dvije točke unutar područja djelovanja polja [3] dobije se integracijom prema izrazu:

The voltage caused by the electrical field between two points inside the area of the field [3] can be calculated according to this equation:

$$V_{ba} = - \int_a^b E_x(x) dx \quad (5)$$

gdje su a i b točke između kojih se računa razlika potencijala, tj. napon, a E_x polje u smjeru x osi.

where a and b are points between which voltage can be measured, while E_x is a field in the direction of the x axis.

Ako se zbog nehomogenosti polja integral iz izraza (5) aproksimira diskretnim vrijednostima unutar nekih konačnih područja stvorenog električnog polja, dobiva se izraz:

If, due to the inhomogeneity of the field, the integral from equation (5) is approximated by discrete values within certain finite areas of the created electrical field, we get the equation:

$$V_{ba} = -\sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(x_i) \quad (6)$$

u kojemu je α_i udio u sumiranju napona, E_i diskretno polje na i -tom djelu raspodjele polja, a širina diskretnog područja djelovanja polja E_i .

Aproksimirane diskretne vrijednosti predstavljaju područja unutar kojih se postavljaju mjerne sonde i, na temelju mjerenja određenog broja sonda, zaključuje se vrijednost mjerene napona.

Retardacija [14] u Pockelsovu efektu može se prikazati sljedećim izrazom:

$$\Delta\beta = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n_0^3 \cdot E \cdot l}{\lambda} \quad (7)$$

u kojemu je $\Delta\beta$ fazna razlika svjetlosti inducirana u kristalu (retardacija), λ valna duljina svjetlosti, n_0 koeficijent loma optičkog kristala, r linearni elektro-optički koeficijent optičkog kristala, E električno polje i l duljina kristala.

Linearni elektro-optički koeficijent kristala r je tenzor koji se, zbog vrlo složenog načina određivanja njegove vrijednosti primjenom matematičkog modela, u praksi najčešće određuje mjerenjem.

Intenzitet polarizirane svjetlosti I nakon prolaska kroz analizator iznosi:

$$I = I_{ul} \cdot \left[1 + \Delta\beta \cdot \frac{\sin \theta \cdot l}{\theta} \cdot \cos(2\phi - \theta \cdot l) \right] \quad (8)$$

gdje je I_{ul} intenzitet svjetlosti na ulazu u kristal, ϕ kut između polarizacijskih osi polarizatora i kristala, θ koeficijent zakreta kristala ($^\circ/\text{mm}$), l duljina kristala i $\Delta\beta$ fazna razlika svjetlosti inducirana u kristalu.

3.2.1 Transverzalna konfiguracija

Kod transversalne konfiguracije mjerenja napona (slika 5) svjetlosni izvor daje svjetlosnu zraku čija se ravnina titranja okreće kutnom brzinom $\Delta\omega t/2$ [4]. Polarizator i analizator imaju međusobno zakrenute osi vektora propuštanja za 45° . Prolaskom zrake kroz kristal te zbog djelovanja električnog polja ravnina titranja dodatno se zakrene za kut θ . Izlazna zraka, zajedno s ulaz-

where α_i is a portion in summing the voltage, E_i is a discrete field on part i of the divided field, and the width of the discrete distance of field E_i .

Approximated discrete values present areas where measuring probes are installed and where, based on the measuring of certain numbers of probes, the value of measured voltage can be determined.

Retardation [14] in the Pockel's effect can be shown by this expression:

Whereas $\Delta\beta$ is the difference in phase shift of light induced in the crystal (retardation), λ is the wave length of light, n_0 the refraction coefficient of the crystal, r the linear electro-optical coefficient of the crystal, E the electric field and l the length of the crystals.

The linear electro-optical coefficient of crystal r is a tensor which because of the complicated way of determining its mathematical value is most commonly determined by measuring.

The intensity of polarized light I after passing through the analyzer is:

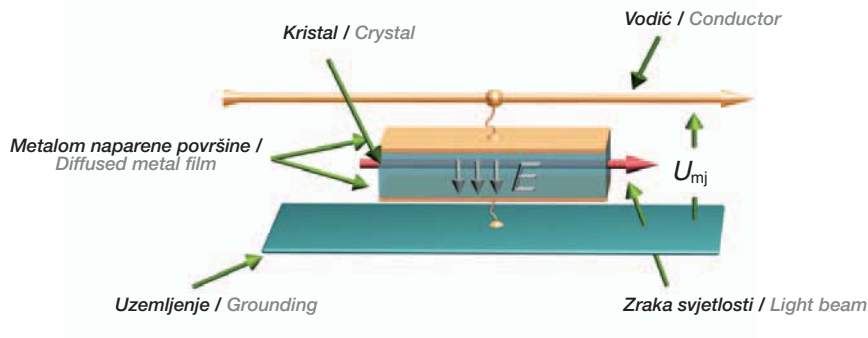
I_{ul} is the light intensity entering the crystal, ϕ is the angle between the polarization axes of the polarizer and crystal, θ the crystal's beam rotation coefficient ($^\circ/\text{mm}$), l length of crystal and $\Delta\beta$ the phase difference induced in the crystal.

3.2.1 Transversal configuration

When measuring voltage in a transversal configuration (Figure 5), the light source spreads a light beam whose oscillation vector rotates with angle velocity $\Delta\omega t/2$ [4]. The polarizer and analyzer vector axes make a 45° angle. When the beam passes through the crystal and the electrical field the oscillation vector is twisted by an additional angle θ . The output beam and input beam are

nom zrakom, dovede se elektroničkom sklopu za detektiranje faznog zakreta. Projekcija okretnog svjetlosnog vektora na vektor propuštanja analizatora daje na izlazu intenzitet svjetlosti:

$$I = \frac{I_0}{2} [1 + \sin(\Delta\omega t + \theta)] \quad (9)$$



Slika 5
Pockelsova ćelija
u transversalnoj
konfiguraciji
Figure 5
Pockel's cell
in transversal
configuration

S obzirom na to da je za mjerenje potrebna samo promjenjiva komponenta zbog usporedbe s ulaznim signalom $I = I_0 \Delta\omega t$ dobiveni se signal filtrira, što osigurava da se uspoređuje samo komponenta:

Only the variable component is needed for the comparison with input signal $I = I_0 \Delta\omega t$. The output signal is then filtered ensuring comparison of the component according to this equation:

$$I = \frac{I_0}{2} \sin(\Delta\omega t + \theta) \quad (10)$$

Kod opisanog načina mjerenja bitan je kut θ te je predmetni sustav neosjetljiv na promjene intenziteta zrake svjetlosti.

In the described method of measuring, the angle θ is important, and this makes the system insensitive to changes of light beam intensity.

3.2.2 Longitudinalna konfiguracija

Alternativni način mjerenja je mjerni sustav amplitudne modulacije (longitudinalna konfiguracija) koji čine polarizator, valni filter za poništavanje retardacije, kristal u električnom polju mjerenog napona i analizator (slika 6) kojim se omogućuje mjerenje napona prema jednadžbi:

3.2.2 Longitudinal configuration

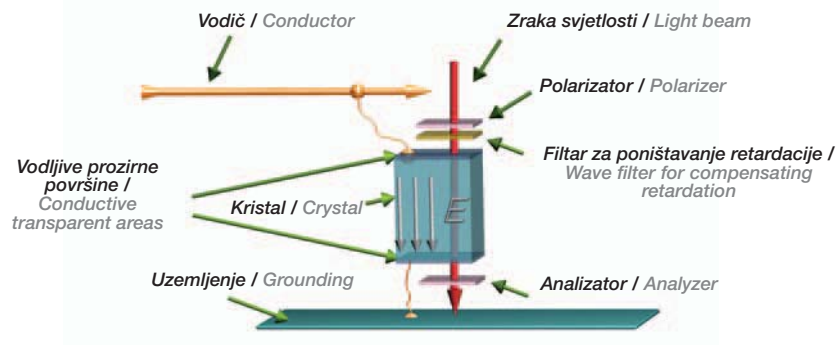
An alternative way of measuring is a measuring system with amplitude modulation (longitudinal configuration) which consists of a polarizer, a wave filter for compensating retardation, a crystal in an electrical field of measured voltage and an analyzer (Figure 6) which enables voltage measuring according to this equation:

$$I = \frac{I_m}{2} \cdot [1 + \sin(K \cdot U(t))] \quad (11)$$

u kojemu je I intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz analizator, I_m početni intenzitet svjetlosti te K konstanta Pockelsove osjetljivosti.

Where I is the light intensity after passing through the analyzer, I_m the light intensity of the input beam, K the Pockel's sensitivity constant.

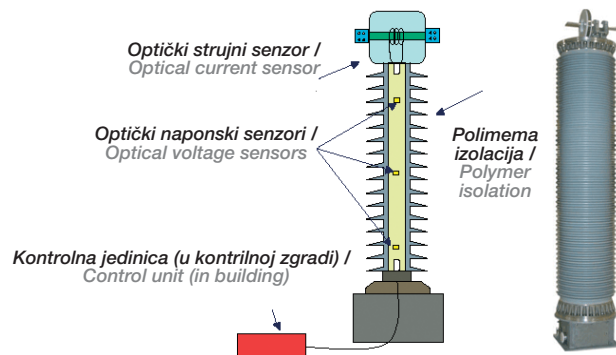
Slika 6
Mjerenje napona pomoću Pockelsove ćelije u longitudinalnoj konfiguraciji
Figure 6
Measuring voltage with Pockel's cells in longitudinal configuration



Za priključenje mjenog napona na ćelije rabe se tanki, metalom napareni slojevi. U praksi se najčešće upotrebljavaju 3 mjerne ćelije koje daju vjernu sliku napona koji se mjeri. Raspored Pockelsovih ćelija u naponskom transformatoru predočen je na slici 7.

Measured voltage is brought to cells by conductors which are then connected to diffused metal film on crystal edges. In practice three cells are most frequently used to give a clear image of the measured voltage. The arrangement of Pockel's cells in a voltage transformer is given in Figure 7.

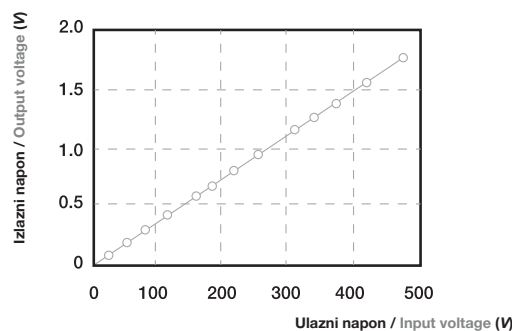
Slika 7
Raspored Pockelsovih ćelija u kombiniranom optičkom mjernom transformatoru
Figure 7
Arrangement of Pockel's cells in combined optical transformer



Obilježje naponskih optičkih mjernih pretvarača koje treba posebno istaknuti je linearnost (slika 8).

The most significant feature of voltage optical measuring transducers is linearity (Figure 8).

Slika 8
Ulazno izlazna karakteristika naponskog optičkog mjernog pretvarača
Figure 8
Input/output characteristic of voltage optical measuring transducer



Prednosti u odnosu na naponske mjerne transformatore s feromagnetskom jezgrom su sljedeće:

Advantages over voltage measuring transformers with a ferro-magnetic core are:

- velika linearnost,
- relativno male dimenzije i mala masa,
- velika osjetljivost na brze promjene,
- ne proizvode elektromagnetske smetnje,

- great linearity,
- relatively small dimensions and small mass,
- high sensitivity to rapid changes,
- does not produce electromagnetic disturbances,

- smanjen rizik od nastanka požara i eksplozija,
- pokazuju veliku točnost mjerenja uz temperaturne promjene [5], [6].

- lower risk of fire and explosion,
- high accuracy even with temperature changes [5] and [6].

4 STRUJNI MJERNI PRETVARAČI

Mjerenje struje složeniji je problem od mjerenja napona, zbog neprekidnog mijenjanja opterećenja te velikog udjela harmoničkih članova. Konvencionalni strujni transformatori imali su više nedostataka. Najveći im je nedostatak zasićenje feromagnetske jezgre istosmjernom komponentom struje tijekom kratkog spoja. Osim toga, dimenzije, masa i cijena strujnih transformatora povećavaju se s obzirom na naponske razine na koje se priključuju.

4 CURRENT MEASURING TRANSDUCERS

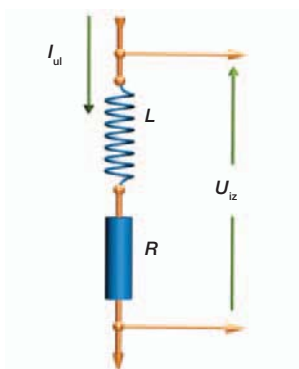
Measuring current is a more complex issue than measuring voltage because of the constant load changes and great amount of harmonic members. Conventional current transformers have many shortcomings. The most significant is saturation of the ferromagnetic core of the direct current component during a short circuit. As well as that dimension, the mass and price of current transformers are increased because of the voltage levels which they are connected to.

4.1 Mjerenje struje padom napona na otporniku (shuntu)

Najjednostavniji način mjerenja struje je mjerenje pada napona koji stvara struja prolaskom kroz otpornik koji ima zanemarivu reaktanciju, shunt [7]. Ograničenja takvog načina mjerenja su toplinsko opterećenje I^2R (Joulesovi gubici) [10] i iznos pada napona, zbog malih dimenzija otpora i neposredne veze s popratnim mjernim komponentama koje se nalaze na istom naponu kao i shunt. To shunt čini neprikladnim za mjerenja vrlo velikih struja. Loše obilježje ovoga mjernog pretvarača je parazitni induktivitet (uobičajene vrijednosti od nekoliko nH) koji može uzrokovati znatan fazni pomak koji, opet, može rezultirati velikim mjernim pogreškama pri malim faktorima snage (slika 9).

4.1 Measuring current by measuring voltage drop on a current shunt

The simplest way of measuring current is by measuring voltage drop caused by current flowing through a resistor with negligible reactance called a shunt [7]. Restrictions to this kind of measuring are temperature overload I^2R (Joule's losses) [10], and the amount of voltage drop because of the small dimensions of the resistor and the close connection to measuring components which are at the same voltage as the shunt. This makes a shunt inappropriate for measuring relatively high currents. A worse characteristic of this measuring transducer is parasitical inductance (usual values of a few nH) which can cause significant phase shift and significant measuring errors while measuring at small power factors (Figure 9).



Slika 9
Mjerenje struje pomoću pada napona na otporniku (shuntu)
Figure 9
Measuring current by measuring voltage drop on a current shunt

Mjerenje struje ograničeno je toplinskim opterećenjem do oko 200 A, a iznad tog iznosa toplinski se gubici u mjernom otporniku znatno povećavaju - zbog čega naglo raste i veličina otpornika. U praksi se na taj način mjeri struja u sustavima napona do 30 kV. Prednosti mjerenja struje shuntom pred mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom su:

Measuring current is limited to 200 A by thermal overload. Above that value thermal losses in the measuring resistor increase significantly causing a sudden increase in the size of the resistor as well. This method of measuring current is used in voltage systems up to 30 kV. Advantages of measuring current with a shunt when compared to measuring transformers with a ferromagnetic core are:

- velika linearnost u širokom području frekvencija,
- jednostavnost izvedbe,
- male dimenzije i masa,
- niska cijena,
- nema efekta ferorezonancije i zasićenja jer nema željezne jezgre,
- nema ni utjecaja susjednih faza na mjerenje.

Točnost mjerenja struje shuntom ovisi o:

- temperaturnom koeficijentu mjernog otpornika,
- parazitnom kapacitetu otpora pri vrlo visokim frekvencijama,
- načinu izvedbe mjernog otpornika (žičani, od posebnog materijala itd.).

- great linearity in a wide frequency range,
- simplicity of production,
- small dimensions and small mass,
- low price,
- no effect of feroresonance and saturation because of the absence of a ferromagnetic core,
- no impact of the neighboring phases on measuring.

Accuracy of measuring current with a shunt depends on:

- temperature coefficient of the resistor,
- parasitical capacitance at high frequencies,
- the way the measuring resistor is made (wire resistor, use of special materials, etc.).

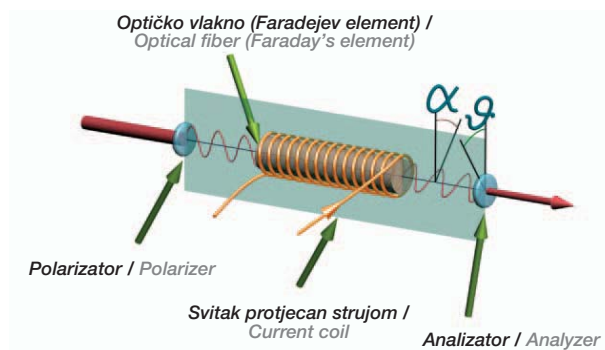
4.2 Strujni optički mjerni pretvarači

Strujni optički mjerni pretvarači temelje svoj rad na zakretu kuta polarizacije svjetlosti pri prolasku polarizirane svjetlosti kroz magnetsko polje, okomito na smjer širenja svjetlosti [4]. Magnetno-optički efekt naziva se Faradejev efekt (slika 10).

4.2 Current optical measuring transducers

Current optical measuring transducers are based on the light polarization angle of the polarized light beam passing through a magnetic field which is perpendicular to the beam's path [4]. This magnetic-optical effect is called the Faraday effect (Figure 10).

Slika 10
Faradejev efekt
Figure 10
Faraday's effect



Svjetlost se u kristal dovodi svjetlovodnim kabelom kroz polarizator, a odvodi svjetlovodnim kabelom kroz analizator u elektronički uređaj za mjerenje promjene intenziteta, što je posljedica zakreta polarizacijske osi nakon prolaska kroz analizator. Ravnina titranja polarizirane svjetlosti zakreće se zbog djelovanja magnetskog polja vodiča, a zakret polarizacijske ravnine pri prolazu kroz analizator očituje se promjenom intenziteta svjetlosti I koja prolazi kroz optički kabel prema elektroničkom sklopu za mjerenje izlaznog intenziteta:

Light is introduced to the crystal by fiber optical cable through a polarizer, and is led through an analyzer by fiber optical cable to an electronic device for measuring intensity change, as a direct consequence to polarization axis twist. The polarization axis of polarized light beam twists because of the conductor's magnetic field, and the twist of the polarization axis while passing through the analyzer manifests itself by changing the intensity of light I passing through an optical cable to a device for measuring output intensity:

$$I_{iz} = I_{ul} \cdot \cos^2(\vartheta - \alpha) \quad (12)$$

gdje je I_{iz} intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz analizator, I_{ul} početni intenzitet svjetlosti nakon prolaska kroz polarizator, α kut zakreta

where I_{iz} is the light intensity after passing through the analyzer, I_{ul} the input light intensity after passing through the polarizer, α is the angle

polarizacijske ravnine zbog djelovanja polja, ϑ kut zakreta polarizacijske ravnine analizatora prema polarizacijskoj ravnini polarizatora koji je suprotan od smjera zakreta polarizacijske ravnine koju stvara polje. Izraz (12) naziva se i Malusov zakon.

Kut α može se izraziti kao:

$$\alpha = C \cdot l \cdot H \quad (13)$$

gdje je C Verdetova konstanta optičkog materijala kroz koji prolazi svjetlost, l efektivna duljina svjetlosne zrake zahvaćena homogenim poljem, a H magnetsko polje koje stvara svitak protjecan mjernom strujom.

S obzirom na to da polje u tako postavljenim geometrijskim odnosima nije homogeno, kut α se dobije integracijom, uporabom izraza:

$$\alpha = C \cdot \int H(l) dl \quad (14)$$

Alternativna konstrukcija jednog takvog sustava za mjerenje struje, u blokovskom prikazu, predočena je na slici 11.

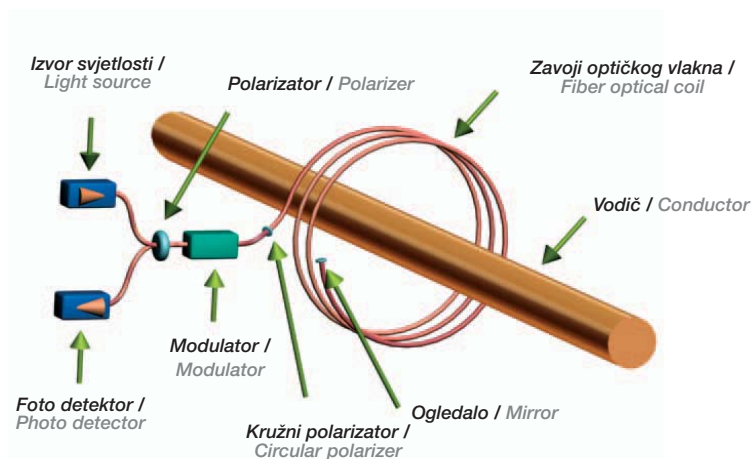
of polarization axis twisted due to impact of the field, ϑ the polarization axis twist of the analyzer compared to polarization axis of the polarizer whose twist direction is opposite to the twist direction of the polarized level made by the field. An expression (12) is also called Malus's law.

The angle α can be expressed as:

where C is Verdet's optical material constant, l the effective length of the light beam in a magnetic homogenous field, H the magnetic field made by current flow through the coil.

Because of no homogenous field in such geometrical relations, the angle α is attained by integration according to the equation:

An alternative construction of such a system for measuring current is shown in block diagram in Figure 11.



Slika 11
Alternativna konstrukcija optičkog sustava za mjerenje struje
Figure 11
Alternative construction of optical system for measuring current

U praksi se često pronalaze pretvarači izrađeni kao kristalni prsten koji navodi zraku svjetlosti da totalnom refleksijom na najmanjoj mogućoj udaljenosti obiđe vodič čija se struja mjeri (slika 12). Takva konfiguracija omogućuje smanjenje utjecaja susjednih vodiča na najmanju mjeru, neovisnost mjerenja o položaju vodiča, smanjenje geometrijskih odstupanja zbog termičkih rastezanja i vibracija itd.

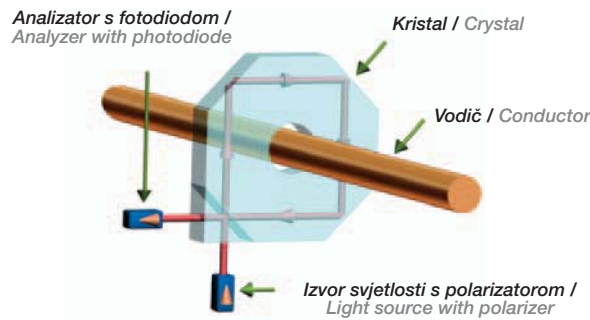
In practice, there are often found transducers made as a crystal ring which leads the light beam to go around the conductor whose current is being measured by the shortest possible distance using total reflection (Figure 12). This kind of configuration enables the impact of neighboring conductors to be reduced, measuring independent of the position of conductor, lowering geometrical deviation because of thermal stretching, vibration, etc.

Slika 12

Usmjeravanje zrake svjetlosti u kristalu mjernog uređaja

Figure 12

Directing the light beam into the crystal of the measuring device



Polarizacijske ravnine polarizatora i analizatora međusobno su zakrenute za 45°. Takva konfiguracija omogućuje mjerenje struje prema zakonu:

The polarizer's and analyzer's polarization levels are twisted by 45°. Such a configuration enables current measuring according to this law:

$$I = \frac{I_m}{2} \cdot [1 + \sin(2C \cdot I(t))] \quad (15)$$

Kao i kod naponskih optičkih mjernih pretvarača, najvažnije obilježje strujnih optičkih mjernih pretvarača je linearnost (slika 13).

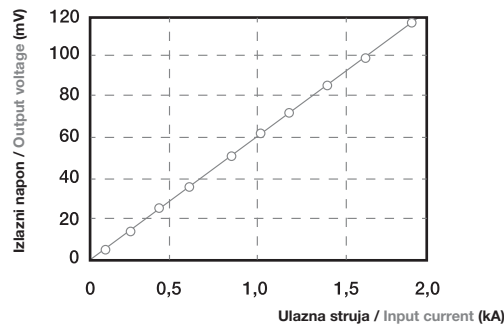
As in the case of voltage optical measuring transducers the most important feature of current optical measuring transducers is linearity (Figure 13).

Slika 13

Ulazno izlazna karakteristika strujnog optičkog mjernog pretvarača

Figure 13

Input-output characteristic of current optical measuring transducer



Prednosti strujnih optičkih mjernih pretvarača naspram konvencionalnih strujnih mjernih transformatora jednake su onima kao i kod naponskih optičkih mjernih pretvarača.

Advantages of current optical measuring transducers when compared to conventional current measuring transformers are the same as in the case of voltage optical measuring transducers.

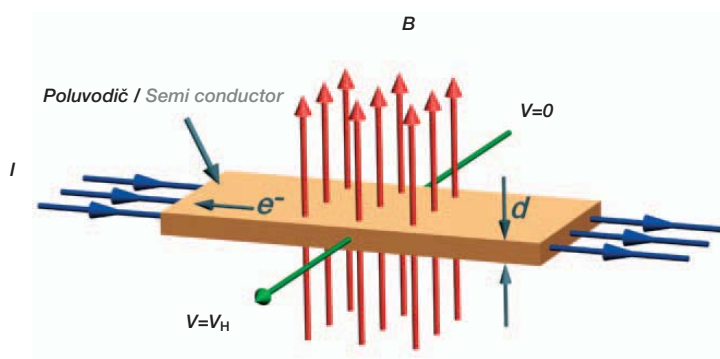
4.3 Hall sonde

Razvoj poluvodičkih elektroničkih komponenata omogućio je izradu minijaturnih mjernih osjetnika magnetskog polja koje stvara vodič protjecan električnom strujom, poznatih pod nazivom Hall sonde (slika 14). Rad tih osjetnika temelji se na Lorentzovu pravilu [10], [15]. Ako električna struja I protječe kroz vodljivu pločicu debljine d koja se nalazi u magnetskom polju B , magnetsko polje djeluje na nositelje naboja u pločici prema Lorentzovu pravilu.

4.3 Hall probes

The development of semiconductor electronic components has made possible the production of miniature magnetic field measuring sensors known as Hall probes (Figure 14). The work of these sensors is based on Lorentz's law [10] i [15]. If an electric current I passes through a plate of thickness d which is situated in magnetic field B , the magnetic field acts on the electrons in the plate according to Lorentz's law.

$$F_m = -q \cdot v_d \times B \quad (16)$$



Slika 14
Načelo rada Hall
sonde
Figure 14
The principle of
the Hall probe

Prema tom pravilu, na naboj djeluje magnetska, Lorentzova sila [10], okomita na smjer magnetskog polja i smjer struje, koja uzrokuje nakupljanje naboja na jednoj strani pločice. Posljedica nakupljanja naboja je mjerljivi napon na rubovima pločice, nazvan Hallov napon [9]:

According to this law magnetic, Lorentz force [10] has influence on electrons in a way that causes electron accumulation on one side of the plate. A direct consequence of this electron accumulation is a measurable voltage at the edges of the plate called Hall's voltage [9]:

$$V_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot q \cdot d} \quad (17)$$

gdje je I jakost električne struje koja prolazi kroz pločicu zbog dovođenja nositelja naboja, B jakost magnetskog polja u kojemu se pločica nalazi, n gustoća mobilnih nositelja naboja, q iznos elementarnog naboja i d debljina pločice.

where I is the current passing through the plate to bring electrons, B the intensity of the magnetic field in which the plate is situated, n the density of non stationary charges, q the amount of elementary charge and d the thickness of the plate.

Hallov napon neposredno je proporcionalan magnetskom polju B koje stvara mjerena struja, pa su sonde pogodne i za mjerenje istosmjernih struja. Tim se postupkom mogu mjeriti istosmjerne struje do 100 kA, uz pogrešku mjerenja od $\pm 10^{-3}$. Za mjerenje izmjeničnih struja potrebni su dodatni elektronički sklopovi za pretvorbu signala u digitalne oblike i daljnju obradu. Hall sonde proizvode se od poluvodičkih elemenata (iridij, iridij-arsen itd.) i vrlo su malih dimenzija, reda veličine nekoliko kubnih milimetara. Zbog toga su mjerni osjetnici s Hall sondama najčešće izvedeni kao zaliveni termootporni plastični kvadri koji u sebi imaju otvor kružnog presjeka kroz koji se provlači vodič. S obzirom na to da su to poluvodičke komponente, često se u jednoj sondi mogu, osim Hall osjetnika, integrirati i analogno digitalni pretvarači, temperaturni kompenzatori, kompenzatori histereze i sklopovlje za linearizaciju čija je namjena postizanje što je moguće vjernije slike mjerene struje.

Hall's voltage is directly proportional to magnetic field B caused by the measured current which makes these probes also appropriate for measuring direct currents. With this procedure direct currents up to 100 kA can be measured with errors of $\pm 10^{-3}$. For measuring alternating currents additional electronic circuits are necessary to transform the signal to digital forms and further processing. Hall probes are made of semiconductors (Iridium, Iridium-Arsenic, etc.) and have very small dimensions (size of a few cubic millimeters). That is why measuring devices with Hall probes are most frequently made as compact thermo-resistant plastic parallelepipeds having a circular hole in the middle for the conductor to pass through. Considering that these are semiconductors, there often can be found in one probe, besides the Hall sensor, analog - digital transducers, temperature compensators, hysteresis compensators and linearization circuits whose aim is to form as clear a picture as possible of measured current.

Prednosti mjernih pretvarača s Hall sondama su:

- jednostavnost izvedbe,
- vrlo male dimenzije i masa,
- niska cijena,
- jednostavna ugradnja,
- nema utjecaja susjednih faza na mjerenje.

4.4 di / dt pretvarači

To su zračni svici torusnog oblika. Služe za pretvorbu mjerene struje u naponski signal, pogodan za daljnju obradu. Vrsta svitaka koji se upotrebljavaju bez feromagnetske jezgre nazivaju se svici Rogowskog (slika 15) [2]. Ta vrsta svitaka konstrukcijski je najjednostavnija, jeftina i prikladna za mjerenje širokog raspona struja različitih frekvencija, a tradicionalno se rabi za mjerenje vrlo velikih struja. Kakvoća svitka kao pretvarača ovisi o stalnosti gustoće zavoja N po jedinici duljine tijela te stalnoj i poznatoj površini S zavoja koji moraju biti okomiti na središnju crtu svitka (bolja se točnost postiže namatanjem na kruta tijela jer savijanjem svitka nastaju odstupanja zavoja od idealnog položaja).

Primjena digitalnih rješenja omogućuje primjenu ove vrste strujnih pretvarača u brojilima - za uporabu u kućanstvima i industriji.

Advantages of transducers with Hall probes:

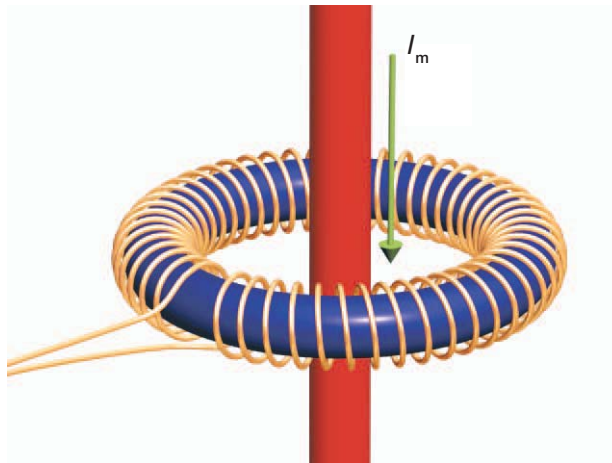
- simplicity of construction,
- very small dimensions and small mass,
- low price,
- simple installation,
- no impact of neighboring phases on measuring.

4.4 di / dt transducers

They are torus-shaped coils with an air core. They are made for transforming measured current to a voltage signal appropriate for further processing. This kind of coil used without a ferromagnetic core is called a Rogowski coil (Figure 15) [2]. This type of coil is of the simplest construction, cheap, appropriate for measuring a wide range of currents of different frequencies, and is usually used for measuring very high currents. The quality of the coil as a transducer depends on the constant density of N turns per unit length, constant and known surface S of the coil which should be perpendicular to the middle line of coil (better accuracy is achieved by winding on firm objects, because twisting the wound coil causes deviation from the ideal coil position).

The appliance of digital solutions enables the application of this kind of current transducer in electricity meters for house usage and in industry.

Slika 15
Rogowski svitak
Figure 15
Rogowski coil



Mjerenje struje di / dt pretvaračem ostvaruje se mjerenjem napona induciranog u torusu svitka nastalog zbog mjene magnetskog toka u svitku koji stvara mjerena struja I_m prema Lentzovu pravilu. Ako se pretpostavi da je svitak namotan na torusnu jezgru pravokutnog presjeka s N namota, kako je to predočeno na slici 16, onda će promjena struje u primarnom vodiču čija se struja mjeri uzrokovati promjenu magnetskog toka u torusu unutar svitka [10]. Promjena magnetskog toka unutar zavoja

Measuring current with a di / dt transducer is done by measuring voltage induced in the coil's torus winding induced by changes of the magnetic flux made by measured current I_m according to Lorentz's law inside the coil. When a coil with N windings is wound onto a torus core of rectangular intersection area as seen in Figure 16, then a change in the current in the primary conductor will cause changes of magnetic flux inside the torus coil [10]. Changes

svitka uzrokovat će indukciju napona prema izrazu:

$$e = -N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (18)$$

gdje je e ukupni inducirani napon u cijelom svitku, N broj namota svitka, $d\phi(t)$ promjena toka unutar jednog namota te dt promjena vremena.

Promjena toka koja uzrokuje indukciju napona u svitku posljedica je promjene struje kroz primarni vodič. Zbog nejednolike preraspodjele toka na različitim udaljenostima od vodiča, potrebno je promatrati tok kroz infinitezimalni dio površine presjeka torusnog svitka dS na udaljenosti r od vodiča.

Na udaljenosti r od vodiča magnetski tok $d\phi$ iznosi:

$$d\phi = B(r) \cdot dS \quad (19)$$

$$dS = a \cdot dr \quad (20)$$

$$d\phi = B(r) \cdot a \cdot dr = \mu \cdot H(r) \cdot a \cdot dr \quad (21)$$

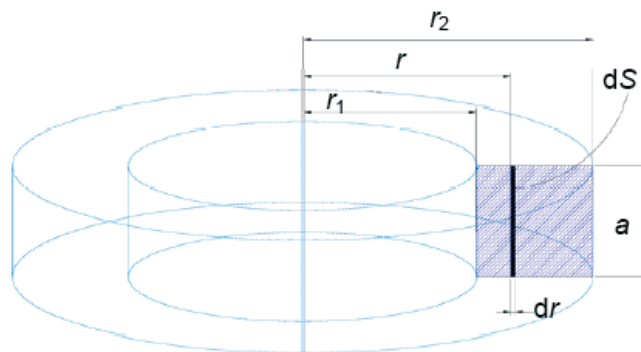
Vidljivo je da je tok kroz površinu dS neposredno proporcionalan jakosti magnetskog polja $H(r)$ na udaljenosti r od vodiča (slika 16). Zato je potrebno poznavati raspodjelu polja - kako bi se mogao izračunati inducirani napon u svitku.

of magnetic flux inside the coil will induce voltage according to:

where e is total induced voltage in the whole coil, N the number of the coil's windings, $d\phi(t)$ the change of magnetic flux inside one coil and dt the time interval.

The change of flux which causes induced voltage inside the coil is the consequence of the current change through the primary conductor. Because of the unequal disposal of the flux at different distances from the coil, it is necessary to watch the flux through an infinitesimal part of the torus area dS at distance r from the coil.

At distance r from the conductor magnetic flux $d\phi$ is:



Slika 16
 Određivanje magnetskog tijeka u torusnom svitku
 Figure 16
 Determining of the magnetic flux inside the torus coil

Uz pretpostavku da je jakost polja na istoj udaljenosti r od vodiča uvijek jednaka, prema zakonu protjecanja vrijedi [10]:

With the assumption that the field is always equal at distance r from the conductor it can be applied that [10]:

$$\sum I = \oint H(r) \cdot dl \quad (22)$$

Kroz jedan zavoj svitka protječe vremenski promjenjiva struja I , tj. sumarna struja koja se dobije integracijom po opsegu kružnice l :

Through a single coil of the coil arrangement flows a changeable current I , (sum of currents) which can be calculated by integration on the circumference of the circle l :

$$I = H(r) \cdot \int_{2 \cdot r \cdot \pi} dl = H(r) \cdot 2 \cdot r \cdot \pi \quad (23)$$

iz čega slijedi raspodjela jakosti magnetskog polja u ovisnosti o udaljenosti r od vodiča:

from which follows the distribution of the strength of the electromagnetic field according to the length r from the conductor according to the equation:

$$H(r) = \frac{I}{2 \cdot r \cdot \pi} \quad (24)$$

Ako se u izraz (21) uvrsti izraz (24) slijedi da je magnetski tijek na udaljenosti r od vodiča:

If equation (21) is connected to equation (24) then the magnetic flux at distance r from the conductor is:

$$d\phi = \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot dr \quad (25)$$

Ukupni tijek kroz torus dobije se integracijom i iznosi:

Total flux through the torus can be calculated by the next integration:

$$\phi = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot r \cdot \pi} \cdot dr = \frac{\mu \cdot a \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (26)$$

Struja koja teče primarnim vodičem vremenski je promjenjiva te će i tijek kroz torusni svitak biti također vremenski promjenjiv. Ako se izraz (26) uvrsti u Lenzovo pravilo (18), dobije se izraz za inducirani napon:

Current flow through the primary conductor changes with time and that causes changes in flux inside the torus coil. If equation (26) is used in Lorentz's law (18) then the induced voltage is:

$$e(t) = -\frac{N \cdot \mu \cdot a}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot \frac{dI(t)}{dt} \quad (27)$$

Za torusni svitak kružnog presjeka s unutarnjim radiusom r_1 i vanjskim radiusom r_2 inducirani napon dobije se numeričkom integracijom izraza:

For a torus coil of circular cross section with inner radius r_1 and outer radius r_2 , induced voltage can be calculated by numeric integration using the equation:

$$e(t) = \frac{\mu}{\pi} \cdot \frac{dI(t)}{dt} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{\sqrt{\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{r_2 + r_1}{2}\right)^2}}{r} \cdot dr \quad (28)$$

Ako se opisanom konstrukcijom di / dt pretvarača žele mjeriti kontinuirane sinusoidalne struje, tada nije potrebna dodatna integracija signala jer se derivacijom struje $I(t)$ ponovno dobije sinusoidalna veličina s faznim pomakom 90° , što omogućuje mjerenje efektivne vrijednosti inducirano napona svitka. Pri tome je pretpostavljeno da mjerena struja ima oblik:

If the described construction of a di / dt transducer is made for measuring continued sinusoidal current, then additional integration of the signal is not needed because derivation of sinusoidal current $I(t)$ obtains sinusoidal signal shifted by 90° , and this is what enables the measuring of effective voltage values induced in the coil. However, it is supposed that measured current can be expressed by this equation:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (29)$$

Uvrštenjem izraza (29) u izraz (27), nakon deriviranja, dobiva se jednačba za inducirani napon u torusu pravokutnog presjeka:

By connecting equation (29) to equation (27), and after derivation, an equation for the induced voltage in a torus of rectangular cross-section is:

$$e(t) = -f \cdot N \cdot \mu \cdot a \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot I_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (30)$$

Ako se odredi efektivna vrijednost, postaje očito da će mjerni uređaj za mjerenje napona zapravo mjeriti efektivnu vrijednost napona koja je neposredno proporcionalna efektivnoj vrijednosti struje:

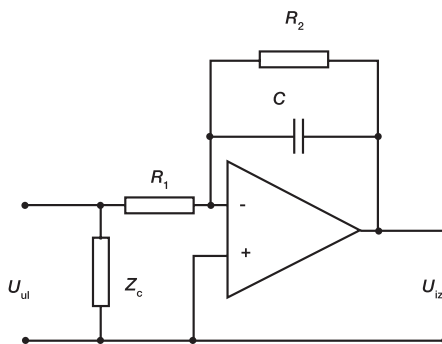
If effective value is determined it becomes obvious that a voltage measuring device actually measures the effective value of voltage that is proportional to the effective value of the current:

$$U_{\text{eff}} = f \cdot N \cdot \mu \cdot a \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot I_{\text{eff}} \quad (31)$$

Može se zaključiti da mjerena vrijednost inducirano napona, kao slike mjerene struje, odnosno prijenosni omjer di / dt pretvarača neposredno ovisi o geometriji sonde, vrsti materijala jezgre μ , i frekvenciji f . Međutim, ako se kao izlaz želi dobiti točna slika mjerene veličine, tada se izlaz sonde mora integrirati jer je dobiveni inducirani napon derivacija mjerene struje, odnosno magnetskog tijeka koji ulančuje svitak. Za integraciju napona često se upotrebljavaju aktivni integratori s operacijskim pojačalom [11].

It can be concluded that the measured value of the induced voltage, or ratio of the di / dt transducer depends on the geometry of the probe, core material μ and frequency f . But if a clear picture of the measured value is required then the probe output must be integrated because the induced voltage obtained is the derivation of the measured current (total magnetic flux to be exact) which is embraced by the coil. For voltage integration active integrators are frequently used with operational amplifier [11].

Slika 17
 Osnovni sklop
 za integraciju
 Figure 17
 Basic circuit for
 integration



$$U_i(t) = -\frac{1}{R_1 \cdot C} \int U_u(t) \cdot dt \quad (32)$$

$$U_i = -\frac{N \cdot \mu \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot I_{mj} \quad (33)$$

$$f_d = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C} \quad (34)$$

Prednosti di / dt mjernih pretvarača pred strujnim mjernim transformatorima s feromagnetskom jezgrom su:

- jednostavnost izvedbe,
- jako male dimenzije i masa,
- niska cijena,
- jednostavna ugradnja,
- zračna jezgra ima linearan fazni odziv,
- mogućnost mjerenja vrlo visokih struja (od 10 A do reda MA),
- niska potrošnja samog uređaja,
- niski temperaturni pomak.

Advantages of di / dt transducers compared to current measuring transformers with a ferromagnetic core are:

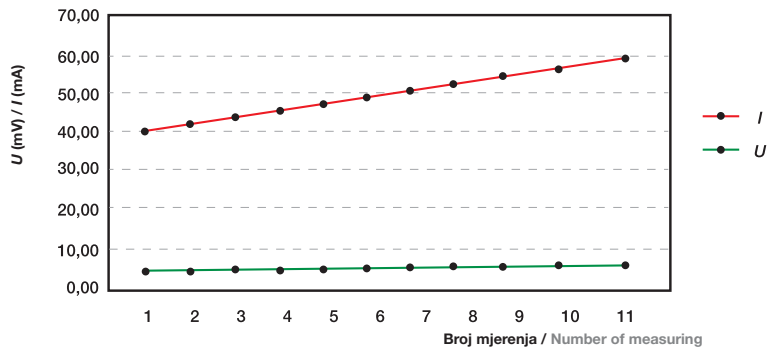
- simplicity of construction,
- very small dimensions and small mass,
- low price,
- simple installation,
- air core has linear phase response,
- possibility of very high current measurements (from 10 A to the order of MA),
- low power consumption of the device itself,
- small temperature shift.

U tablici 1 prikazani su rezultati mjerenja napona induciranog u pretvaraču namotanom na feritnoj jezgri, pa je nacrtan odgovarajući graf na kojemu je vidljiva linearnost u području u kojemu feritni materijal na koji je namotan svitak ima linearnu karakteristiku. Mjerene su vrlo male struje (mA) iz čega se može zaključiti da su pretvarači primjenjivi i za takva mjerenja te su upotrebljivi i u mjernim tehnikama opće namjene.

The Table 1 shows the results of measuring induced in a transducer wound onto a ferrite core and it also shows linearity in the area where ferrite material has linear characteristics. Only small currents have been measured (mA) which leads to conclusion that transducers are applicable for this kind of measuring, and also usable in general purpose measuring techniques.

Tablica 1 - Rezultati mjerenja napona induciranog u di / dt pretvaraču namotanom na feritnoj jezgri
 Table 1 - Results of voltage measuring induced in di / dt transducer wound onto a ferrite core

Broj mjerenja Number of measuring	Feritna jezgra (pravokutni presjek) / Ferrit core (rectangular cross section)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I (mA)	40,00	42,00	44,00	46,00	48,00	50,00	52,00	54,00	56,00	56,00	56,00
U (mV)	3,10	3,30	3,40	3,60	3,80	4,00	4,20	4,30	4,40	4,40	4,40
I/U	12,90	12,73	12,94	12,78	12,63	12,50	12,38	12,56	12,73	12,73	12,73



Slika 18
Linearnost di/dt
pretvarača
Figure 18
Linearity of di/dt
transducer

U tablici 2 predočene su osobine mjerne sonde (pretvarača) koja je upotrijebljena za to mjerenje. Prijenosni omjer upotrijebljenog pretvarača: $I/U = 12,7$.

Table 2 shows features of the measuring probe (of transducer) which was used for test measuring. Transmission ratio: $I/U = 12,7$.

Tablica 2 - Osobine mjerne sonde / Table 2 - Characteristics of the transducer measuring probe

Osobina / Feature	Osobina / Feature	Iznos / Value	Mjerna jedinica / Unit
Unutarnji promjer / Inner diameter	d_1	15	mm
Vanjski promjer / Outer diameter	d_2	25	mm
Unutarnji polumjer / Inner radius	r_1	7,5	mm
Vanjski polumjer / Outer radius	r_2	12,5	mm
Širina / Width	a	8	mm
Unutarnji opseg / Inner perimeter	O_u	47,12	mm
Promjer žice / Wire diameter	\emptyset	0,6	mm
Broj namotaja / Number of windings	N	69	

Odstupanja na kraju mjerenja javljaju se zbog nelinearnosti krajnjeg dijela skale analognih mjernih instrumenata, a vrijednosti variraju i zbog sustavnih pogrešaka. Odabrana feritna jezgra pokazuje početak zasićenja kod struja većih od 250 mA. Proučavanje osobina pretvarača pokazuje da se upotrebom svitaka bez feromagnetske jezgre dobivaju najvjernije slike mjerene struje zbog njihove linearne karakteristike u čitavom mjernom području, bez obzira na mjernu veličinu.

Deviations which appear at the end of measuring are a consequence of the non-linearity in the final part of the scale of analog measuring devices, these values also vary because of systematic errors. The chosen ferrite core begins to saturate at currents greater than 250 mA. Studying the features of the transducers shows that the use of coils without a ferromagnetic core gives the most accurate measuring signals because of their linear characteristic in the whole measured area no matter the size of the measured value.

4.5 Usporedba strujnih mjernih pretvarača

U tablici 3 prikazana je usporedba glavnih osobina mjernih pretvarača za mjerenje struje [7].

4.5 Comparison of current measuring transducers

Table 3 shows a comparison of transducers for measuring current [7].

U tablici 3 mogu se uočiti znatne prednosti primjene optičkih pretvarača za mjerenje struje u elektroenergetskim postrojenjima.

From Table 3 can be seen significant advantages of appliance optical transducers for current measuring in electrical power transmission systems.

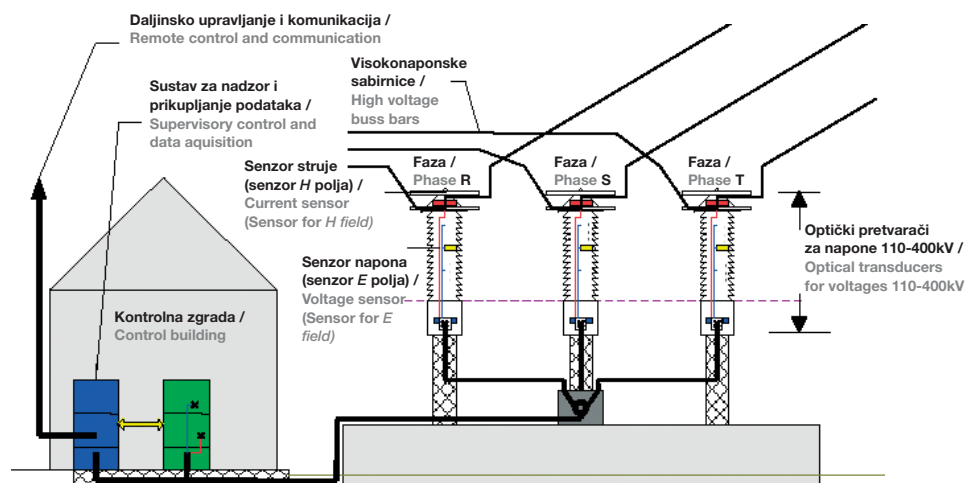
Tablica 3 - Usporedba glavnih osobina mjernih pretvarača za mjerenje struje
Table 3 - Comparison of the current measuring transducers main features

Karakteristika / Feature	Niskoomski shunt / Current shunt	Strujni mjerni transformator sa željeznom jezgrom / Current transformer	Hall sonda / Hall sonde	Optički mjerni pretvarač / Optical transducer	di/dt pretvarači / transducer
Cijena / Price	niska / low	srednja / middle	srednja / middle	srednja / middle	niska / low
Linearnost / Linearity	odlična / excelent	loša do srednja / quite low	loša / low	vrlo dobra / very good	vrlo dobra / very good
Mogućnost mjerenja velikih struja / High current measurement	jako slaba / very weak	dobra / good	dobra / good	vrlo dobra / very good	vrlo dobra / very good
Potrošnja / Consumption	niska do velika / low to high	srednja / middle	niska / low	niska / low	niska / low
Temperaturna ovisnost / Temperature stability	srednja / middle	niska / low	niska do srednja / low to middle	srednja / middle	jako niska / very low
Dimenzije / Dimensions	male do srednje / small to middle	velike / large	jako male do srednje / very small to middle	jako male do velike / very small to large	jako male do srednje / very small to middle
Problem zasićenja i histereze / Saturation and hysteresis	da / yes	da / yes	da / yes	da / yes	da / yes
Izobličenja i histereza / Distorsions	ne / no	ne / no	ne / no	ne / no	ne / no

Primjer uporabe kombiniranih optičkih mjernih pretvarača predočen je na slici 19.

Example of usage of combined optical measuring transducers is given in Figure 19

Slika 19
Kombinirani optički mjerni pretvarači u visokonaponskom postrojenju
Figure 19
Combined optical measuring transducers in high voltage power plant



5 ZAKLJUČAK

Godinama se primarna i sekundarna oprema za elektroenergetska postrojenja razvijala i promatrala odvojeno. Električka veza između te opreme uglavnom se ostvaruje galvaniski (bakrenim vodičima). U težnji da se smanje troškovi i poveća pouzdanost, nastoji se ta dva sustava spojiti, a za to su vrlo pogodni nekonvencionalni mjerni pretvarači. Oni omogućuju povezivanje primarne opreme sa sekundarnom opremom uporabom svjetlovoda koji imaju znatne prednosti pred vodičima (male dimenzije i masa, izvrsna dielektrička svojstva, veliki kapacitet prijenosa informacija, nesjetljivost na elektromagnetske smetnje itd.).

Od nekonvencionalnih pretvarača u elektroenergetskim postrojenjima u svijetu trenutačno se najviše upotrebljavaju optički mjerni pretvarači. U hrvatskom elektroenergetskom sustavu optički mjerni pretvarači nisu još nigdje ugrađeni. No, s obzirom na sve prednosti koje imaju, za pretpostaviti je da će se uskoro započeti i s njihovom primjenom u elektroenergetskim postrojenjima našega EES-a.

5 CONCLUSION

For years primary and secondary equipment for power plants were developed and considered separately. An electrical connection between this equipment is mostly achieved by using copper conductors. The tendency for lowering costs and increasing reliability resulted in attempts to connect the two systems which can be done by unconventional measuring transducers. They enable connecting primary to secondary equipment by optical fibers which have significant advantages when compared to conductors (small dimensions and small mass, great dielectric features, large capacity of information transfer, insensitivity to electromagnetic disturbances etc.).

In the world, of unconventional transducers optical measuring transducers are most frequently used. In the Croatian electro-energetic system optical transducers have not yet been installed anywhere. But considering all the advantages they have, this should happen in the near future.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] ABB, Line entrance module, ABB 2006.
- [2] MAHONEN, P., MOISIO, M., HAKOLA, T., KUISTI, H., The Rogowski Coil and Voltage Divider in Power System Protection and Monitoring, CIGRÉ, Paris, 28 August - 3 September, 1996 Session, Ref. 34-103
- [3] KANOI, M., TAKASHI, G., SATO, T., HIGAKI, M., MORI, E., OKUMURA, K., Optical Voltage and Current Measuring System for Electric Power System, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 1, No. 1, 1986, pp. 91-97
- [4] Opto-electronic Sensors, A New Generation of Instrument Transformers, ALSTOM
- [5] RAHMATIAN, F., CHAVEZ, P. P., JAEGER, N. A. F., A 230 kV Optical Voltage Transducer Using Multiple Electric Field Sensors, IEEE 2002.
- [6] RAHMATIAN, F., CHAVEZ, P. P., JAEGER, N. A. F., 138 kV and 345 kV Wide-Band SF6-Free Optical Voltage Transducers, IEEE 2002.
- [7] KOON, W., Current Sensing for Energy Metering, Analog Devices, <http://www.analog.com/energymeter>
- [8] VUJEVIĆ, D., Pretvornici umjesto strujnih i naponskih transformatora, Energija, Vol. 47, No. 4, 1998., str. 303-311
- [9] RUDAN, M., Determination of the Hall Voltage in Devices with Arbitrary Aspect Ratio and Probe Position, ESSDERC 2003.
- [10] PINTER, V., Osnove elektrotehnike I, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [11] PAUNOVIĆ, S., Elektronički sklopovi, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [12] http://www.rossengineeringcorp.com/hv_dividers.htm
- [13] DEER, M. J. (Department of Physics, University of Bath, Bath, BA2 7AY, UK), HIRST, G. J., SHAIKH, W. (Central Laser facility, CLRC Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxon, OX11 0QX, UK), Possible Electro-optic Materials for use in Vacuum Ultra Violet Pockels Cells, 2001
- [14] <http://scienceworld.wolfram.com/physics/PockelsEffect.html>
- [15] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/hall.html>

Uredništvo primilo rukopis:
2005-11-25

Prihvaćeno:
2006-04-03

Manuscript received on:
2005-11-25

Accepted on:
2006-04-03

PRENAPONSKA ZAŠTITA OBJEKATA SPOJENIH NA NADZEMNU NISKONAPONSKU MREŽU SURGE PROTECTION OF BUILDINGS CONNECTED TO AN OVERHEAD LOW-VOLTAGE NETWORK

Dr. sc. Viktor Milardić, prof. dr. sc. Ivo Uglešić, Doc. dr. sc. Ivica Pavić,
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva,
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Viktor Milardić, PhD, Prof Ivo Uglešić, PhD, Assistant Prof Ivica Pavić, PhD,
University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing,
Unska 3, 10000 Zagreb, Croatia

U prenaponskoj zaštiti na niskom naponu postoje tri klase uređaja prenaponske zaštite. Predstavljena metoda izbora uređaja prenaponske zaštite može se koristiti pri donošenju odluke koje klase treba biti uređaj prenaponske zaštite koji se postavlja u priključni mjerni ormarić objekta. Metoda je testirana na jednoj tipičnoj nadzemnoj niskonaponskoj mreži u Hrvatskoj. S obzirom na dobro iskustvo s uređajima prenaponske zaštite klase II u transformatorskim stanicama u toj mreži, može se zaključiti da je uređaj prenaponske zaštite klase II sasvim primjeren i za objekte spojene na niskonaponsku mrežu.

There are three classes of surge protective devices for low-voltage systems. The method for the selection of surge protective devices presented can be used to determine which class of surge protective device should be installed in the service entrance of a building. This method has been tested on a typical overhead low-voltage network in Croatia. Based upon good experience with Class II surge protective devices in the transformer stations of this network, it can be concluded that Class II surge protective devices are quite suitable for buildings connected to a low-voltage network.

Ključne riječi: nadzemna niskonaponska mreža, štice objekta, UPZ klasa I, UPZ klasa II, uređaj prenaponske zaštite (UPZ), vjerojatnost energetskog preopterećenja
Key words: class I SPD, class II SPD, overhead low-voltage network, probability of energy overloading, protected building, surge protective device (SPD)



1 UVOD

Vrlo skoro distributeri električne energije u Hrvatskoj počeli će ugrađivati ili nuditi mogućnost ugradnje prenaponske zaštite u kućni priključni-mjerni ormarić (KPMO). Postavlja se pitanje kakav uređaj prenaponske zaštite (UPZ) treba ugraditi u KPMO. Prema [1] razlikuju se UPZ klase I, UPZ klase II i UPZ klase III. UPZ klase I ispituje se strujnim valovima 8/20 μ s, 10/350 μ s te naponskim valom 1,2/50 μ s. UPZ klase II ispituje se strujnim valom 8/20 μ s i naponskim valom 1,2/50 μ s. UPZ klase III ispituje se kombiniranim valom 1,2/50 / 8/20 μ s (otvoreni krug/kratki spoj generatora). Oko uvođenja strujnog vala 10/350 μ s za ispitivanje UPZ-a klase I postoji nesuglasje u prvom redu između IEC norme 61643-1 [1] i IEEE C62.45 [2], a šire bi se moglo reći između stajališta znanstvenika i stručnjaka iz Europe i SAD-a. U SAD-u se na priključak objekta ugrađuje uređaj prenaponske zaštite klase II.

2 PRENAPONSKA ZAŠTITA I UREĐAJI PRENAPONSKE ZAŠTITE

U prenaponskoj zaštiti na niskom naponu (NN) UPZ klase I često se naziva odvodnik struje munje (njem. Blitzstrom Ableiter), a UPZ klase II odvodnik prenapona (njem. Überspannung Ableiter). Njemačka norma [3] dijeli odvodnike prema klasi zahtjevnosti na:

- odvodnike klase A (prema [1] UPZ klase II) koji se instaliraju u nadzemnu NN mrežu na mjesta koja su za opću populaciju nedostupna. Odvodnici klase A ispituju se strujnim valovima 8/20 μ s, a prekondicioniraju istim valovima,
- odvodnike klase B (prema [1] UPZ klase I) koji se instaliraju u svrhu izjednačavanja potencijala na mjestima gdje je potrebno odvoditi dijelove struje munje. Odvodnici klase B ispituju se strujnim valovima, I_{imp} , valnog oblika 10/350 μ s, a prekondicioniraju valovima 8/20 μ s,
- odvodnike klase C (prema [1] UPZ klase II) koji se instaliraju u svrhu prenaponske zaštite u fiksnim instalacijama, npr. u NN razvod. Odvodnici klase C ispituju se strujnim valovima 8/20 μ s, a prekondicioniraju istim valovima,
- odvodnike klase D (prema [1] UPZ klase III) koji se instaliraju u svrhu prenaponske zaštite u fiksnim ili priključenim instalacijama, ili prije krajnjeg uređaja. Postoje specijalne izvedbe ovih odvodnika u formi instalacijske utičnice.

1 INTRODUCTION

In the very near future, distributors of electrical energy in Croatia will begin to install or offer the option of installing surge protective devices in service entrances. It is necessary to determine the type of surge protective device (SPD) to be installed in a service entrance. According to [1] there are three types of SPDs: Class I, Class II and Class III. Class I SPDs are tested using 8/20 μ s and 10/350 μ s current waves and a 1,2/50 μ s voltage wave. Class II SPDs are tested with an 8/20 μ s current wave and a 1,2/50 μ s voltage wave. Class III SPDs are tested with a 1,2/50 / 8/20 μ s combination wave (open circuit/short circuit of the generator). Regarding the introduction of the 10/350 μ s current wave for the testing of Class I SPDs, there are discrepancies between IEC 61643-1 [1] and IEEE C62.45 [2], and more generally it could be said between the positions of professionals from Europe and the USA. In the USA, Class II surge protective devices are installed in the service entrances of buildings.

2 SURGE PROTECTION AND SURGE PROTECTIVE DEVICES

In surge protection at low voltages, Class I SPDs are frequently called lightning current arresters (German: Blitzstrom Ableiter), and Class II SPDs are called surge arresters (German: Überspannung Ableiter). The German standard [3] classifies arresters according to the performance requirements:

- class A surge arresters (according to [1] Class II SPDs) that are installed in an overhead low-voltage network in a place inaccessible to the general population. Class A surge arresters are tested with 8/20 μ s current waves, and preconditioned with the same waves,
- class B surge arresters (according to [1] Class I SPDs) that are installed for the purpose of potential equalizing in places where protection against lightning strokes are necessary. Class B surge arresters are tested with 10/350 μ s current waves, I_{imp} , and preconditioned with 8/20 μ s waves,
- class C surge arresters (according to [1] Class II SPDs) are installed for surge protection in fixed installations, e.g. in low-voltage distribution. Class C surge arresters are tested with 8/20 μ s current waves, and preconditioned with the same waves,
- class D surge arresters (according to [1] Class III SPDs) are installed for surge protection in fixed or mobile/fixed installations, or before the

Odvodnici klase D ispituju se kombiniranim generatorom (efektivnog unutarnjeg otpora 2) koji u praznom hodu proizvodi naponski val 1,2/50 μ s, a u kratkom spoju strujni val 8/20 μ s. Odvodnici klase D također se prekondicioniraju kombiniranim valom. Kao ispitni parametar za ovaj odvodnik navodi se napon praznog hoda U_{oc} kombiniranog generatora.

UPZ na bazi MO (metal-oksidnog) varistora nije pogodan za ispitivanje strujnim valom duljeg trajanja, za razliku od UPZ-a na bazi iskrišta. Za objašnjenje, neka se usvoji strujni val 10/350 μ s kao predstavnik dugog vala, a strujni val 8/20 μ s kao predstavnik kratkog vala. Da bi se jasno predočila razlika između strujnih valova 10/350 μ s i 8/20 μ s, oba su vala prikazana na slici 1.

Pri prolasku strujnog vala 10/350 μ s kroz MO odvodnik napon na njemu relativno je visok u usporedbi s iskrištem. Kada se integrira produkt trenutačne vrijednosti struje, napona i vremena, dobije se velika energija koju bi trebala apsorbirati MO pločica. MO pločica može apsorbirati ograničenu količinu energije (zagrije se) da bi ostala termički stabilna jer je priključena na radni napon.

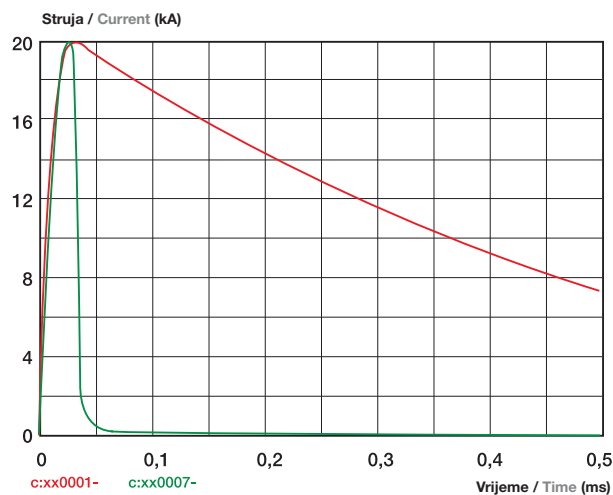
Pri prolasku strujnog vala 10/350 μ s kroz iskrište napon na njemu je nizak (napon luka). Ako se sad integrira produkt trenutačne vrijednosti struje, napona i vremena, dobije se znatno manja energija koju treba apsorbirati iskrište. Zbog toga je iskrište pogodno za ispitivanje i duljim valovima.

final device. There are special versions in the form of a receptacle. Class D surge arresters are tested with a combination wave generator (2 effective internal resistance), which generates a 1,2/50 μ s voltage wave in an open circuit, and an 8/20 μ s current wave in a short circuit. Class D surge arresters are also preconditioned with a combination wave. The open circuit voltage U_{oc} of a combination wave generator is specified for this class of arresters.

An SPD based on a metal-oxide (MO) varistor is not suitable for testing with a current wave of long duration, unlike SPDs based on a spark gap. To demonstrate this, let us take a 10/350 μ s current wave as a representative of a long wave, and an 8/20 μ s current wave as a representative of a short wave. The difference between 10/350 μ s and 8/20 μ s current waves is evident in Figure 1.

When a 10/350 μ s current wave passes through an MO arrester, the voltage is relatively high compared with a spark gap. When the products of the instantaneous current, voltage and time values are integrated, great energy is obtained which must be absorbed by an MO disc. An MO disc can absorb a limited amount of energy (it heats up) in order to remain thermally stable, since it is connected to a voltage source.

When a 10/350 μ s current wave passes through a spark gap, the voltage is low (arc voltage). If the products of the instantaneous current, voltage and time values are now integrated, significantly less energy is obtained for the spark gap to absorb. Therefore, a spark gap is also suitable for testing with long waves.



Slika 1
Strujni valovi 10/350 μ s i 8/20 μ s, 20 kA
Figure 1
10/350 μ s and 8/20 μ s, 20 kA current waves

Energija koju apsorbira MO odvodnik razmjerna je površinama ispod krivulja na slici 1. Jasno je da ispitivanje strujnim valom 10/350 μ s predstavlja mnogostruko veći energetska zahtjev za UPZ na bazi MO odvodnika. Zbog toga UPZ na bazi MO, uobičajene površine presjeka pločice, može termički izdržati strujne valove oblika 10/350 μ s samo relativno male amplitude (do oko 5 kA).

U tablici 1 prikazano je mjesto postavljanja UPZ-a u odgovarajuće prenaponske kategorije te zadaća koju UPZ-i pojedinih klasa imaju. Prema tablici, svaki vod (električni, komunikacijski) koji ulazi u objekt, iz zone gdje su mogući udari munje, treba na ulazu u objekt štiti odgovarajuće postavljenim UPZ-om klase I. Za slučaj napajanja objekta električnom energijom preko nadzemne NN mreže dobije se slika 2. Ispred brojila je potrebno postaviti UPZ klase I (odvodnik struje munje). Tipično mjesto postavljanja UPZ-a klase II je razvodni ormar (ploča). UPZ klase II može sigurno odvesti strujne valove oblika 8/20 μ s, amplituda u području kA i sniziti preostali napon UPZ-a klase I. UPZ klase III postavlja se između razvodnog ormara (ploče) i krajnjeg uređaja ili u utičnicu. Neki osjetljivi uređaji imaju, unutar kućišta, ugrađenu i vlastitu prenaponsku zaštitu.

Okako koncipirana prenaponska zaštita, ako je korektno izvedena, daje gotovo apsolutnu zaštitu. Za prenaponsku zaštitu vrlo vrijednih instalacija i pogona, moglo bi se reći, oportuno je držati se gornjeg IEC koncepta. Za zaštitu jednostavnijih objekata (npr. obiteljske kuće) treba učiniti odgovarajuće pojednostavljenje. Zašto? Prvi je razlog taj što okako koncipirana prenaponska zaštita za jednostavnije objekte nije zaživjela. Odnosno, bar što se tiče Hrvatske, jednostavniji objekti najčešće nemaju nikakvu prenaponsku zaštitu. Drugi razlog, koji je povezan s prvim, jest cijena okako koncipirane zaštite.

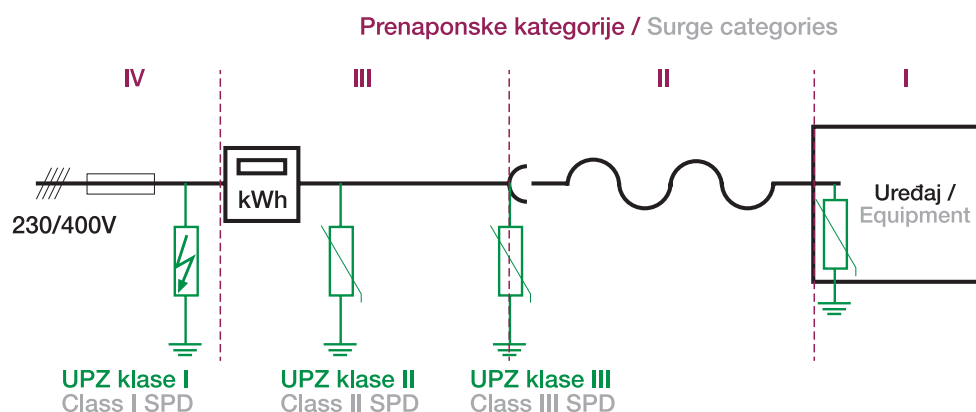
The energy absorbed by an MO arrester is proportional to the surfaces below the curves in Figure 1. It is clear that testing with a 10/350 μ s current wave places a far greater energy requirement upon an MO-based SPD arrester. Therefore, an MO-based SPD, with the customary cross-sectional disc surface, can only thermally withstand 10/350 μ s current waves of relatively low amplitudes (up to approximately 5 kA).

Table 1 presents the locations for SPD installation according to the corresponding surge categories and the tasks performed by the SPDs of the individual classes. According to the table, every line (power supply, communication) that enters a building from a zone where lightning strokes are possible should be protected at the entry to the building by a properly installed Class I SPD. Figure 2 presents the configuration when a building is supplied by an overhead low-voltage network. Upstream from the meter, it is necessary to install a Class I SPD (lightning current arrester). A typical site for the installation of a Class II SPD is the distribution panel. A Class II SPD can safely divert 8/20 μ s current waves of amplitudes of the order of kA and decrease the residual voltage of a Class I SPD. A Class III SPD is placed between the distribution panel and the final device or a receptacle. Some sensitive devices have their own surge protection installed within the housing.

The configurations described above, if correctly performed, provide almost perfect protection. For the surge protection of very valuable installations and plants, it is opportune to adhere to the above IEC concept. However, for the protection of simpler buildings (e.g., family homes), simplification is necessary. Why? The first reason is that such a concept for the surge protection of simpler buildings has not become the norm. At least as far as Croatia is concerned, simpler buildings most often have no surge protection whatsoever. The second reason, in connection with the first, is the prohibitive cost of such surge protection.

Tablica 1 - Izbor i mjesto postavljanja UPZ-a [4]
Table 1-The selection and location of SPDs [4]

Mjesto postavljanja / Location	Prenaponska kategorija / Surge categories		
	IV Priključak objekta / Service entrance	III Razvod / Distribution panel	II Utičnica / Receptacle
Zadaća SPD-a / SPD task			
Izjednačavanje potencijala/ prenaponska zaštita uređaja / Potential equalizing/Equipment surge protection Odvođenje (dijela) struje munje / Diversion (partial) of lightning current	UPZ klase I - odvodnik struje munje / Class I SPD - lightning current arrester		
Prenaponska zaštita uređaja / Equipment surge protection Snizjenje preostalog napona SPD-a klase I / Reduction of the residual voltage of Class I SPD Ograničenje induciranih prenapona / Limiting of induced voltage surges		UPZ klase II / Class II SPD	
Prenaponska zaštita uređaja / Equipment surge protection Ograničenje sklopnih prenapona / Limiting of switching surges Snizjenje preostalog napona prethodnih UPZ / Reduction of the residual voltage of previous SPDs			UPZ klase III / Class III SPD



Slika 2
Prenaponska zaštita
prema IEC-u
Figure 2
Surge protection
according to the IEC

Jedno od mogućih pojednostavljenja prenaponske zaštite je tzv. kombinirani UPZ klase I koji u sebi ujedinjuje i UPZ klase II. Ovaj kombinirani UPZ klase I ima svojstvo klase I, kapacitet odvođenja relativno velikih struja valnog oblika 10/350 μ s, a s druge strane svojstvo UPZ klase II, nizak preostali napon. Ovo se rješenje na prvi pogled čini optimalnim, ali glavni mu je nedostatak visoka cijena.

Drugo je rješenje jednostavno izostavljanje prvog stupnja (UPZ klase I), slika 3. Na njegovo bi se mjesto postavio UPZ klase II te bi se zaštita izvela u dva stupnja, što je i praksa distributera električne energije u SAD-u [5].

Očekivani nedostatak ovog rješenja je moguće energetske preopterećenje UPZ-a klase II u KPMO-u objekta.

U sljedećem poglavlju prikazana je metoda kojom će se razmotriti energetske opterećenje UPZ-a klase II u KPMO-u. Na taj će se način pokušati dati i odgovor na općenitu potrebu za UPZ-om klase I (odvodnikom struje munje). To nadalje znači i potrebu za ispitivanjem strujnim valom 10/350 μ s. Naime, IEEE C62.45 [2] ne predviđa takav val za ispitivanje UPZ-a. Dakle, cilj je razmatranja koje slijedi provjera mogućnosti ugradnje UPZ-a klase II u KPMO-u, uzimajući prihvatljivim vrlo malu vjerojatnost (relativnu frekvenciju) energetske preopterećenja tijekom životnog vijeka (jedanput u sto ili jedanput u dvjesto godina). Metoda polazi od pretpostavke da je prihvatljiv zanemarivo mali broj kvarova UPZ-a zbog energetske preopterećenja, a uzima se u obzir vjerojatnost pojave struja munje određenih amplituda i vremena trajanja vala, za razliku od pristupa u IEC normama koje uzimaju maksimalno moguće vrijednosti.

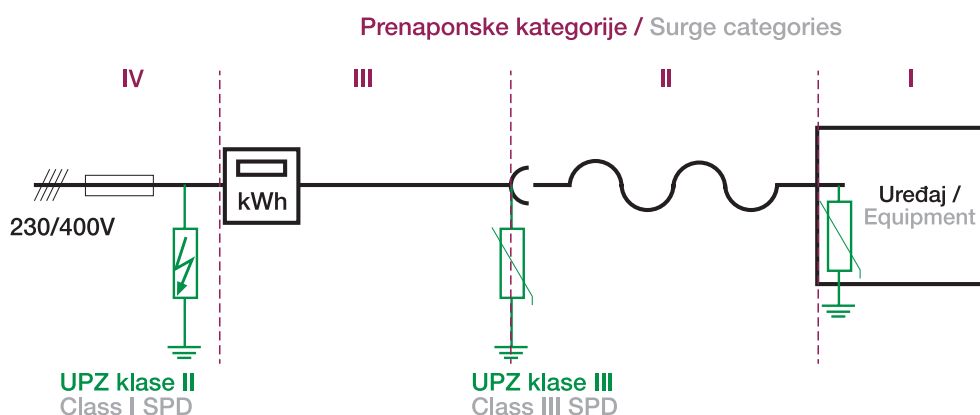
One of the possible simplifications of the surge protection configuration is a Class I SPD combined with a Class II SPD. This combined Class I SPD has the attributes of Class I, with the capacity to conduct relatively large 10/350 μ s current waves, and the attribute of the low residual voltage of a Class II SPD. At first glance, this solution seems optimal but its major drawback is its high cost.

Another solution is simply to omit the first stage (Class I SPD), Figure 3. It is replaced by a Class II SPD and surge protection occurs at two levels, as is the practice of power distributors in the USA [5].

An anticipated drawback of this solution is the possibility of energy the overloading of the Class II SPD at the service entrance of a building.

In the next chapter, a method is presented for the energy load analysis of a Class II SPD at a service entrance. This is an attempt to provide an answer to the general need for Class I SPDs (lightning current arresters). It further signifies the need for testing with a 10/350 μ s current wave. IEEE C62.45 [2] does not anticipate this waveform for SPD testing. The goal of the following analysis is to determine the possibility of installing Class II SPDs in a service entrance, taking into account the very low probability (relative frequency) of energy overloading during its lifetime (one time in a hundred years or one time in two hundred years). The method is based upon the premise that the very low number of SPD failures due to energy overloading is acceptable, and takes into account the probability of the occurrence of lightning currents of defined amplitude and wave duration, unlike the approach in the IEC standards that takes the maximum possible values.

Slika 3
Prenaponska
zaštita u dva
stupnja
Figure 3
Two-stagesurge
protection



3 METODA IZBORA UREĐAJA PRENAPONSKE ZAŠTITE U NN SUSTAVIMA

Ideja metode izbora UPZ-a u NN sustavima, koja će biti izložena u nastavku, u najkraćem se sastoji u sljedećem:

- za svaku tipičnu primjenu UPZ-a napravi se odgovarajući EMTP-ATP (Electromagnetic Transient Program - verzija ATP) model,
- usvoji se prihvatljiv rizik kvara zbog energetskog preopterećenja UPZ-a klase II,
- prema usvojenom riziku odabire se odgovarajuća struja munje,
- provode se simulacije udara munje i računa energetskog opterećenja UPZ-a,
- simulacijama dobivena relativna frekvencija energetskog preopterećenja povezuje se s usvojenim rizikom te donosi zaključak je li UPZ klase II adekvatan za primjenu.

Blok-dijagram metode prikazan je na slici 4.

Zbog ograničenosti prostora svi elementi gornjeg blok dijagrama neće se opisivati detaljno. Npr. za prihvatljivi rizik kvara, zbog energetskog preopterećenja, UPZ-a klase II u KPMO-u obiteljske kuće, bez sustava zaštite od munje (SZM) predlaže se $R_{TK} = 10^{-2}$ (jedanput u sto godina).

ATPDraw model NN mreže (s Al/Če vodičima ili samonosivim kabelskim snopom) je frekvencijski zavisni model s konstantnom realnom transformacijskom matricom (J. Marti). Ovaj model uključuje i skin-efekt. Isti je model usvojen i za priključak objekta na NN mrežu.

3 THE METHOD FOR THE SELECTION OF SURGE PROTECTIVE DEVICES IN LOW- VOLTAGE SYSTEMS

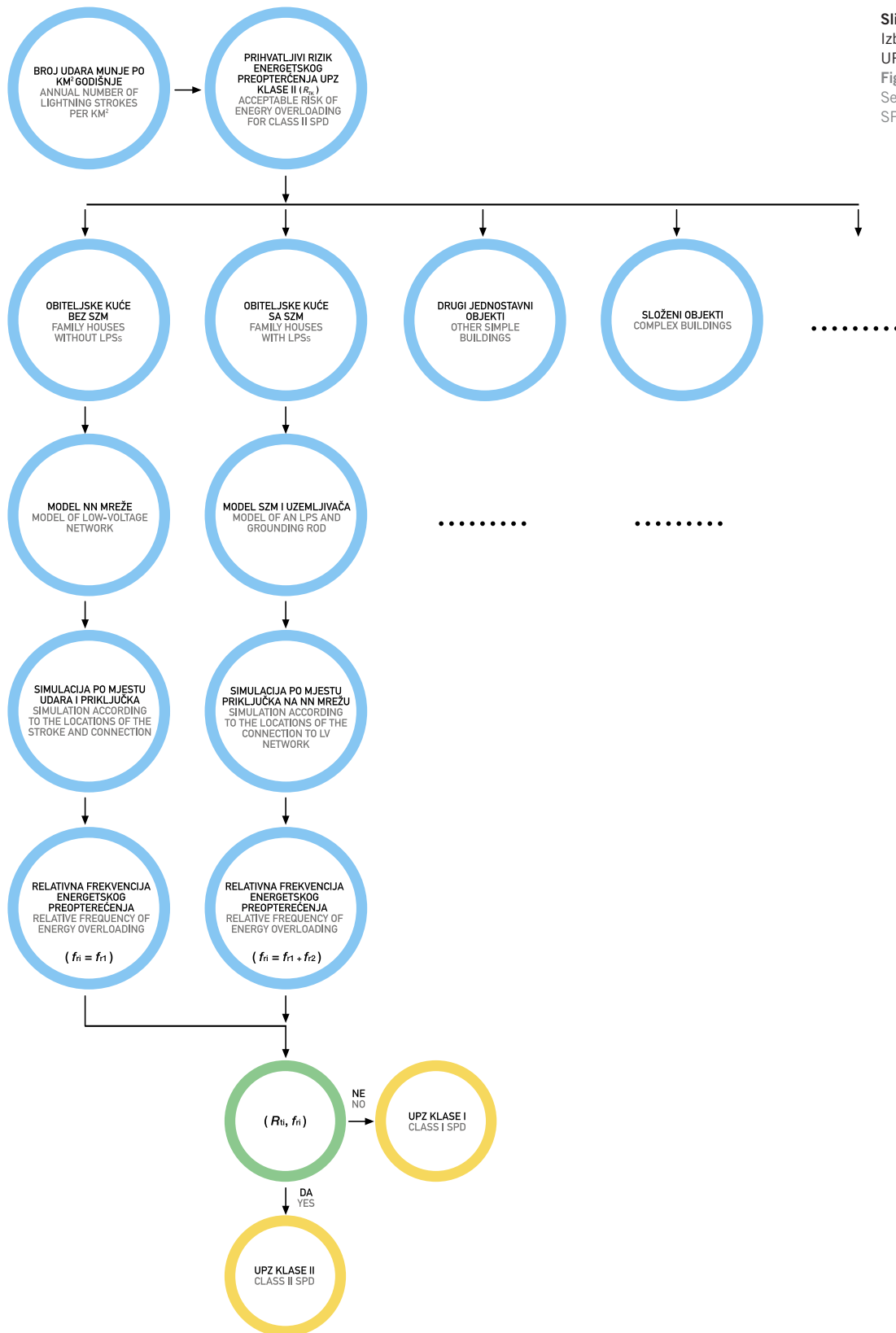
The concept of the method for the selection of SPDs in low-voltage systems, that will be presented, briefly consists of the following:

- for every typical SPD application, a corresponding EMTP-ATP (Electromagnetic Transient Program - version ATP) model is devised,
- an acceptable risk of failure due to the energy overloading of Class II SPDs is adopted,
- the corresponding lightning current is chosen according to the adopted risk,
- lightning stroke simulation is performed and the energy load of the SPD is calculated,
- through simulations, the relative frequency of energy overloading is obtained, which is then correlated with the adopted risk, on the basis of which it is concluded whether a Class II SPD would be adequate.

A block diagram of this method is presented in Figure 4.

Due to space limitations, all the elements of the above block diagram will not be described in detail. For example, as the acceptable risk of failure due to energy overloading with a Class II SPD at the service entrance in a family house without a lightning protection system (LPS), $R_{TK} = 10^{-2}$ (once in a hundred years) is proposed.

The ATPDraw model of a low-voltage network (with aluminum/steel conductors or aerial bundle cable) is a frequency-dependent model with a constant, real transformation matrix (J. Marti). This model also includes the skin effect. The same model has been adopted for the connection of a building to a low-voltage network.



Slika 4
Izbor odgovarajućeg
UPZ-a za objekte
Figure 4
Selection of suitable
SPDs for buildings

Pri udaru munje u najviši vodič NN mreže dolazi do preskoka i na ostale vodiče. Preskok se može modelirati na različite načine. Najčešće se koristi karakteristika napon/vrijeme koja daje ovisnost vršne vrijednosti napona specifičnog valnog oblika o vremenu do preskoka. Prema [6], za jednostavnije analize, detaljni model luka, koji nastaje pri preskoku izolatora, nije nužan. Električni luk dovoljno je modelirati kratkim spojem (idealni prekidač). Pritom se koristi izraz za određivanje napona, pri kojemu dolazi do preskoka zračnog razmaka:

When lightning strikes the highest conductor in a low-voltage network, a flashover to other conductors occurs. The flashover can be modeled in various ways. Most often, the voltage/time characteristic is used. It gives the dependence of the peak values of the voltage of a specific waveform on the time up to the flashover. According to [6] for a simpler analysis, a detailed model of the arc occurring at the flashover of the insulator is not essential. It is sufficient to model the electric arc with a short circuit (ideal switch). The following expression may be used to determine the voltage at which air gap flashover occurs:

$$U_{pr} = K_1 + \frac{K_2}{t^{0,75}} \quad (1)$$

gdje su:

U_{pr} - preskočni napon u (MV),
 $K_1 = 0,4 l$,
 $K_2 = 0,71 l$,
 l - dužina izolatora (ili zračni razmak) (m),
 t - vrijeme trajanja čela (μ s).

whereas:

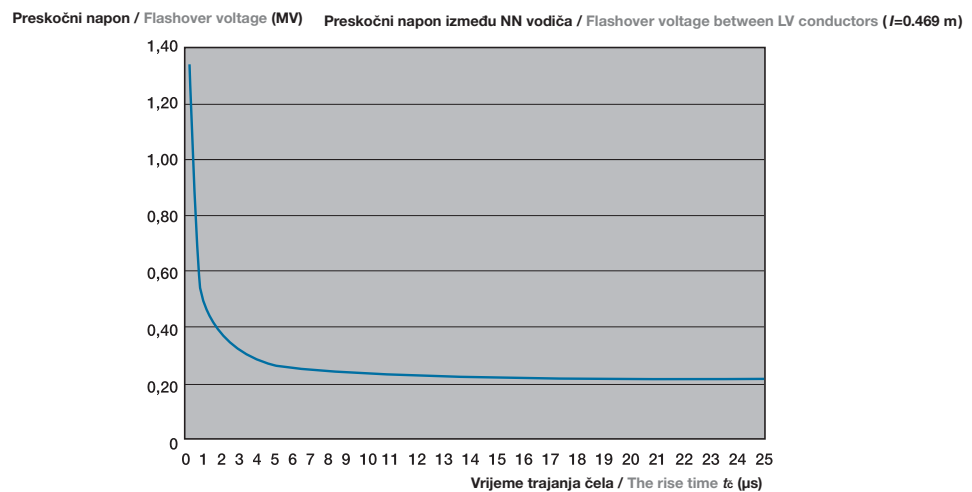
U_{pr} - the flashover voltage (MV),
 $K_1 = 0,4 l$,
 $K_2 = 0,71 l$,
 l - the length of the insulator (or the air gap) (m),
 t - the rise time (μ s).

Izraz (1) za tipičnu nadzemnu NN mrežu izvedenu Al/Če vodičima prikazan je slikom 5.

Expression (1) for a typical overhead low-voltage network using aluminum/steel conductors is presented in Figure 5.

Slika 5

Vremenska ovisnost preskočnog napona zračnog razmaka između vodiča NN mreže
 Figure 5
 Time dependence of air gap flashover voltage between the conductors of a low-voltage network

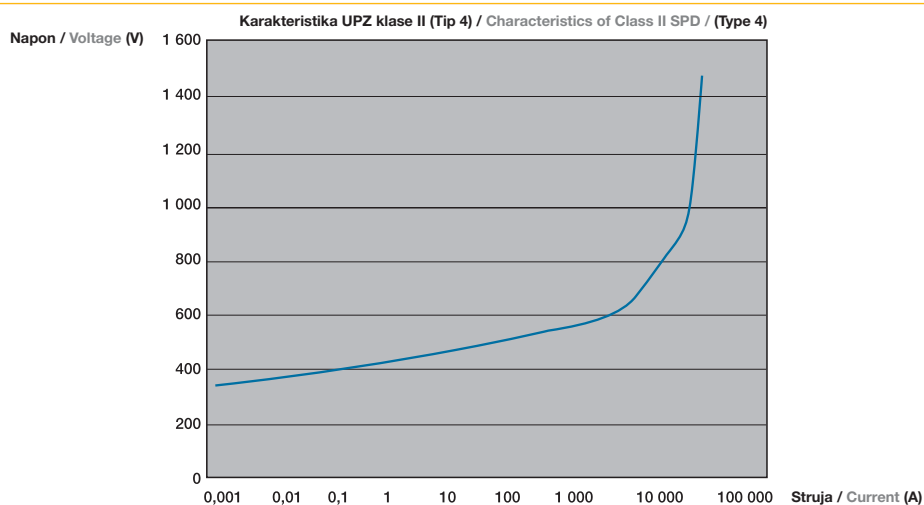


U nadzemnoj NN mreži UPZ-i klase II nalaze se u ormariću TS i na kraju mreže. U novije se vrijeme UPZ-i klase II postavljaju i na prvom stupu NN mreže ispred TS. Pretpostavka je također da je u KPMO-u objekta UPZ klase II. Za modeliranje UPZ-a u ATPDraw-u potrebna je $U-I$ karakteristika. Kako $U-I$ karakteristike NN UPZ-a obično nisu dostupne u katalozima proizvođača, mogu se snimiti u laboratoriju. Primjer djelomično laboratorijski snimljene karakteristike jednog UPZ-a klase II kakav se koristi u NN mreži dan je u tablici 2. Na slici 6 prikazana je strujno-naponska karakteristika istog UPZ-a. Ova se karakteristika koristi u modelu UPZ-a u ATPDraw-u.

In an overhead low-voltage network, Class II SPDs are installed in the transformer station cubicle and at the end of the network. In recent times, Class II SPDs are installed on the first pole of a low-voltage network upstream of the transformer station. Also, it is assumed that Class II SPDs are installed in the service entrance of a building. The voltage-current characteristic is necessary to make an SPD model in ATPDraw. Since voltage-current characteristics of low voltage SPDs are generally not available in manufacturer's catalogues, they can be obtained in the laboratory. An example of a voltage-current characteristic of a Class II SPD used in a low voltage network, partially taken in the laboratory, is presented in Table 2. The current-voltage characteristic of the same SPD is presented in Figure 6. This characteristic is used in the SPD model in ATPDraw.

Tablica 2 - Preostali napon pri strujnom valu 8/20 μ s, UPZ klase II (Tip 4)
Table 2 - Residual voltage at 8/20 μ s current wave, Class II SPD (Type 4)

MOSA 280 $U_c = 280$ V~, $I_n = 10$ kA, $I_{max} = 20$ kA, $U_p = 1,1$ kV							
1,03 kA	1,53 kA	2,03 kA	2,5 kA	4,5 kA	5,05 kA	5,75 kA	6,45 kA
750 V	800 V	840 V	880 V	980 V	1 020 V	1 030 V	1 050 V

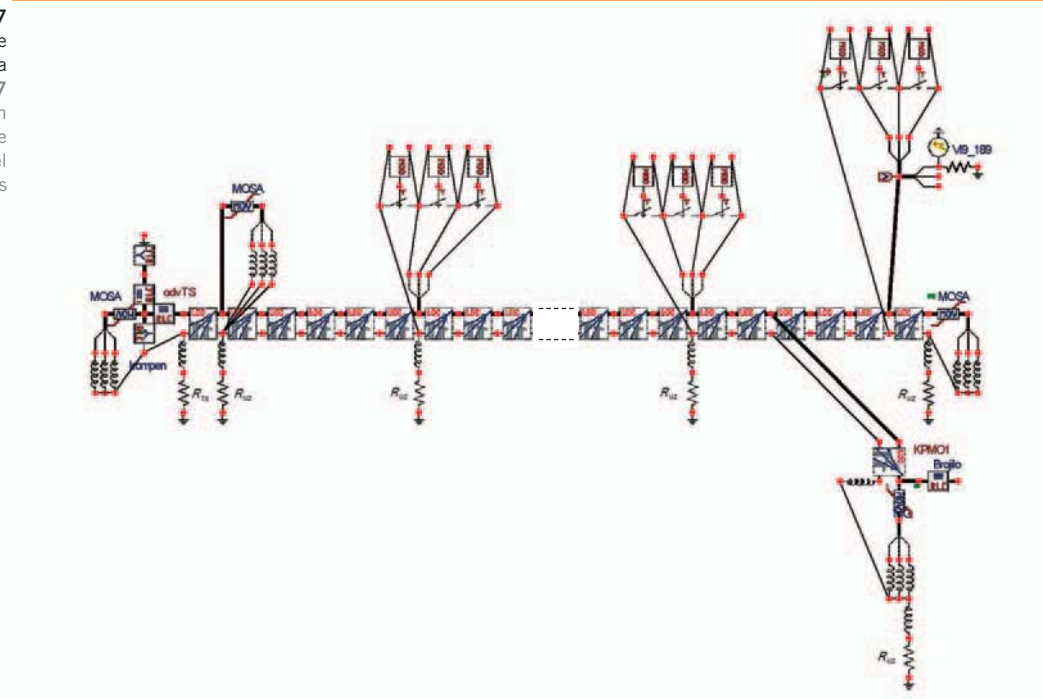


Slika 6
Strujno-naponska karakteristika UPZ-a u NN mreži
Figure 6
Current-voltage characteristics of an SPD in a low-voltage network

ATPDraw model NN mreže prikazan je na slici 7.

An ATPDraw model of a low-voltage network is presented in Figure 7.

Slika 7
 ATPDraw model nadzemne
 NN mreže s Al/Če vodičima
 Figure 7
 ATPDraw model of an
 overhead low-voltage
 network with aluminum/steel
 conductors



3.1 Vjerojatnost i distribucija struja munje koje pogadaju nn mrežu

Vjerojatnost pogotka struje munje u NN mrežu ovisi u gustoći udara munje u tlo, odnosno o kerauničkoj razini područja gdje se mreža nalazi.

Za određivanje broja udara munje u NN mrežu može se koristiti izraz iz [7], koji se koristi i za VN vodove:

3.1 Probability and distribution of lightning currents striking a low-voltage network

The probability of lightning currents striking a low-voltage network depends upon the density of the lightning striking the ground, i.e. the keraunic level of the area in which the network is located.

To determine the number of lightning strokes to a low-voltage network, it is possible to use the expression from [7], that is also used for high-voltage lines:

$$N_L = 0,004 \cdot T^{1,35} \cdot (b + 4 \cdot h^{1,09}) \quad (2)$$

gdje su:

N_L - broj udara munje u vod dužine 100 km u godini,

T - keraunički nivo (broj grmljavinskih dana u godini),

h - prosječna visina zaštitnog vodiča (m) (u slučaju NN mreže visina najvišeg vodiča),

b - vodoravna udaljenost između zaštitnih vodiča (u slučaju NN mreže nula).

whereas:

N_L - the number of lightning strokes to a 100 km power line per year,

T - the keraunic level (the number of days with thunder per year),

h - the average height of the grounding conductor (m) (in the case of a low-voltage network, the height of the highest conductor),

b - the horizontal distance between the grounding conductors (which is zero in the case of a low-voltage network).

Ako se usvoji keraunički nivo (npr. $T = 35$ dana), može se izračunati očekivani broj udara munje po jedinici dužine NN mreže. Uz prosječnu visinu najvišeg vodiča NN mreže iznad tla 7,1 m dobije se:

If a keraunic level (e.g., $T = 35$ days) is adopted, it is possible to calculate the anticipated number of lightning strokes per unit of length of a low-voltage network. With an average above-ground height of 7,1 m for the highest conductor of a low-voltage network, the following can be obtained:

$$N_L = 16,46 \left[\frac{1}{\text{km} \cdot 100 \cdot \text{god}} \right] \quad (3)$$

Dakle za 1,0 km NN mreže može se očekivati 16,46 udara munje u 100 godina.

Poznata je činjenica da je više od 90 % silaznih munja negativnog polariteta [8], a da su pozitivni udari karakteristični za visoke građevine (npr. objekti na vrhovima planina, visoke zgrade...).

Najčešće korišteni izraz za raspodjelu vršnih vrijednosti negativnih silaznih struje munje je, prema [7]:

Hence, for a 1,0 km low-voltage network it is possible to anticipate 16,46 strokes of lightning per 100 years.

The fact is known that more than 90 % downward lightning strokes have a negative polarity [8], whereas strokes of positive polarity are characteristic for high buildings (e.g., buildings on tall mountains, high-rise buildings etc.).

The most frequently used expression for the peak value distribution of negative downward lightning currents, according to [7], is as follows:

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31} \right)^{2,6}} \quad (\text{p.u.}) \quad (4)$$

gdje su:

P_I - vjerojatnost da je struja munje veća od I ,
 I - struja munje, kA.

whereas:

P_I - the probability that the lightning current is greater than I ,
 I - lightning current, kA.

Ako se u izraz (4) za P_I uvrsti $1/16,46 = 0,06075$, dobije se:

If in expression (4) the value $1/16,46 = 0,06075$ is substituted for P_I , the following is obtained:

$$I = 31 \cdot \left(\frac{1 - P_I}{P_I} \right)^{\frac{1}{2,6}} = 88,87 \text{ kA} \quad (5)$$

Prema (5), samo 6,075 % od svih struja munje bit će veće amplitude od 88,87 kA.

According to (5), only 6,075 % of all lightning currents will be of amplitudes greater than 88,87 kA.

U skladu s (3), može se očekivati da će samo 1 udar munje, koja pogađa 1 km NN mreže u 100 godina, biti veći od 88,87 kA. Dakle, vjerojatnost udara munje amplitude struje veće od 88,87 kA u 1 km NN mreže je 0,01. Slično razmatranje može se provesti i za trajanje čela, odnosno hrpta struje munje.

According to (3), it can be anticipated that only one lightning stroke that strikes a 1 km low-voltage network in 100 years will be greater than 88,87 kA. Hence, the probability of a lightning stroke of an amplitude greater than 88,87 kA in a 1 km low-voltage network is 0,01. A similar approach can be applied to determine the rise time and tail time of lightning current.

Na kraju ovog dijela još se jedanput može sumirati prije izloženi primjer. U 1 km NN mreže, u vremenskom razdoblju od 100 godina, može se očekivati 16,46 udara munje. Od tih udara munje samo će 1 udar biti veće amplitude od 88,87 kA. Također će samo jedan udar munje imati vrijeme

At the end of this section, it is possible once again to summarize the previously presented example. In a 1 km low-voltage network, during a period of 100 years, 16,46 lightning strokes are to be expected. Of these lightning strokes, only one stroke will be of

trajanja čela dulje od 9 μs , odnosno vrijeme trajanja hrpta dulje od 189 μs . Zbog toga će se simulacija udara munje u NN mrežu provesti strujom amplitude 88,87 kA i valnog oblika 9/189 μs .

3.2 Rezultati simulacije energetskog opterećenja uređaja prenaponske zaštite u kućnom priključnomjermnom ormariću objekta

3.2.1 Rezultati za model NN mreže izvedene Al/Če vodičima

Poznato je iz teorije vjerojatnosti da relativna frekvencija nekog događaja teži vjerojatnosti tog događaja kada broj pokusa teži u beskonačnost. Kako je u praksi nemoguće provesti jako veliki broj simulacija za koji bi se moglo kazati da teži u beskonačnost, mora se koristiti relativna frekvencija događaja. S obzirom na to da postoji jako veliki broj promjenjivih veličina u modelu nadzemne mreže, mjestu udara munje, parametrima udara munje, mjestu priključka objekta s obzirom na mjesto udara itd., neke od njih moralo se držati konstantnima. Tako su sve simulacije provedene istom strujom munje 88,87 kA 9/189 μs . Parametri mreže i priključka također su držani konstantnima. Promjenjivo je bilo mjesto udara munje i mjesto priključka objekta u mrežu.

U slučaju promjene samo tih dvaju parametara dobije se jako veliki broj kombinacija. Npr. udar munje može pogoditi svaki stup u NN mreži (raspon dužine je 33 m, odnosno 35 m). Dakle, prema usvojenom modelu, u 1 km NN mreže moguće je 31 mjesto udara munje. Također, priključak objekta može biti bilo na kojem mjestu u mreži, od TS do zadnjeg stupa - dakle, na 31 mjestu prema usvojenom modelu. Ako se izračuna mogući broj kombinacija, dobije se 961. Samo za ovaj slučaj nadzemne mreže i kombinirajući samo dva parametra potrebno je napraviti 961 proračun.

Kako je jedan raspon NN mreže relativno kratak (33 m, odnosno 35 m) a dužina priključka još kraća (20 m), potrebno je imati i relativno mali korak proračuna u EMTP-ATP-u. Ako se pretpostavi brzina gibanja EM vala jednaka brzini svjetlosti 300 m/ μs , jasno je da EM val prijeđe 20 m za 0,067 μs . Zbog toga je usvojen korak proračuna $\Delta t = 0,01 \mu\text{s}$.

Energija koju apsorbira UPZ, na bazi MO pločice, određena je izrazom:

an amplitude greater than 88,87 kA. Furthermore, only one lightning stroke will have a rise time longer than 9 μs , and a tail time longer than 189 μs . Therefore, the simulation of a lightning stroke in a low-voltage network will be performed with a current wave having an amplitude of 88,87 kA and a 9/189 μs waveform.

3.2 Results of energy load simulation for surge protective devices in the service entrance of a buildings

3.2.1 Results for a model of a low-voltage network with aluminum/steel conductors

It is known from probability theory that the relative frequency of an event approaches the probability of that event when the number of tests approaches infinity. Since in practice it is impossible to perform such a large number of simulations for which it would be possible to say that they approach infinity, it is necessary to use the relative frequency of an event. Since there are very many variables in a model of an overhead network, such as the location of the lightning stroke, the parameters of the lightning stroke, the location of the connection of a building relative to the location of the lightning stroke etc., some of these variables had to be considered as constants. Thus, all the simulations were performed with the same lightning current of 88,87 kA 9/189 μs . Network and connection parameters were also considered to be constants. The location of the lightning stroke and the location of the building connection to the network were variables.

In the event of changes in only these two parameters, a very large number of combinations can be obtained. For example, lightning can strike every pole in a low-voltage network (with a pole spacing of 33 m or 35 m). According to the model adopted, in a 1 km low-voltage network, 31 sites of lightning strokes are possible. Furthermore, a building connection can be at any point within the network, from the transformer station to the last pole, i.e. at any of 31 places according to the adopted model. If the possible number of combinations is calculated, 961 is obtained. Only for this case of an overhead network and by combining two parameters, it is necessary to perform 961 calculations.

Since the pole spacing in a low-voltage network is relatively short (33 m or 35 m), and the length of the connection is even shorter (20 m), it is necessary to have a relatively small increment for calculation in the EMTP-ATP. If the velocity of the electromagnetic wave propagation is assumed to be equal to the speed of light (300 m/ μs), it is clear that the electromagnetic wave requires 0,067 μs to travel 20 m. Therefore, the increment of $\Delta t = 0,01 \mu\text{s}$ has been adopted.

The energy absorbed by a SPD based on an MO disc is determined by the following expression:

$$E = \int u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (6)$$

Poznata je činjenica da UPZ ograničava napon, pa u gornjem izrazu promjenjiva $u(t)$ se mijenja ograničeno. Ako se pogleda promjenjiva $i(t)$, ista se mijenja u granicama od manje od 1 mA do više desetaka kA, dakle više milijuna puta. Integraciju je stoga potrebno provoditi dokle god kroz UPZ teče znatnija struja, odnosno dok je napon na UPZ-u veći od njegova trajnog radnog napona.

It is a well-known fact that an SPD limits voltage. Therefore, $u(t)$ in the above expression changes within limits. The variable $i(t)$ changes from less than 1 mA to many tens of kA, i.e. several million times. It is therefore necessary to perform integration as long as a significant current flows through an SPD, i.e. as long as the voltage on an SPD is greater than its continuous operating voltage.

Naravno, u vremenski promjenjivim prijelaznim procesima praktično je nemoguće za računanje energije koristiti navedeni analitički izraz. EMTP-ATP za računanje gornjeg izraza koristi numeričku integraciju zasnovanu na trapeznom pravilu (7).

In transient processes varying in time, it is practically impossible to use the above analytical expression for energy calculations. For the calculation of the above expression, EMTP-ATP uses numerical integration based upon the trapezoid rule (7).

$$E = \sum_{j=1}^n \frac{u_j + u_{j-1}}{2} \cdot \frac{i_j + i_{j-1}}{2} \cdot \Delta t \quad (7)$$

Ako se hoće numerički izračunati energija koju apsorbira UPZ, proračun je potrebno raditi toliko dugo dok kroz UPZ ne prestane teći znatnija struja. Mora se promatrati cijela prijelazna pojava do njezina potpunog prigušenja. To je vrijeme u slučaju udara munje u NN mreže dužine 1 km oko 1,8 ms, a u nekim slučajevima i dulje. Ako se sada potrebno vrijeme proračuna podijeli s korakom proračuna ($\Delta t = 0,01 \mu s$), dobije se $n = 180\,000$ koraka proračuna. Jedan takav proračun na suvremenom računalu traje oko dvije minute.

In order to calculate the absorbed energy by an SPD numerically, it is necessary to perform the calculation for as long as significant current flows through it. It is necessary to observe the entire transient state until it is fully attenuated. This time in the case of a lightning stroke in a 1 km low-voltage network is approximately 1,8 ms, and in some cases longer. If the calculation time is now divided by the increment ($\Delta t = 0,01 \mu s$), it yields $n = 180\,000$ calculation steps. On a modern computer, such a calculation requires approximately two minutes.

Zbog toga su prvo učinjeni proračuni s korakom priključka i mjesta udara 100 m, tablica 3.

It is for this reason that calculations with both building connection distance and lightning stroke distance of 100 m are performed first, Table 3.

Tablica 3 - Energetsko preopterećenje UPZ-a klase II u KPMO-u i TS
Table 3 - Energy overloading of a Class II SPD at a service entrance and transformer station

		Mjesto udara u NN mrežu od TS (udar u fazu A) / Distance of lightning stroke in a low-voltage network from the transformer station (strike in Phase A)											
		0m	100m	200m	300m	400m	500m	600m	700m	800m	900m	1000m	
Mjesto priključka objekta udaljeno od transformatorske stanice / Distance of building connection from transformer station	0m	A(1)	-(1)	-(1)	-(1)	-(1)	-(-)	-(-)	-(-)	-(-)	-(-)	-(1)	
	100m	A(1)	A,BiC(1)	-(3)	-(3)	-(2)	-(2)	-(2)	-(2)	-(2)	-(2)	A(3)	
	200m	A(1)	A(3)	A,BiC(1)	-(3)	-(3)	-(3)	-(2)	-(2)	-(2)	-(3)	A(3)	
	300m	A(1)	-(3)	-(3)	A,BiC(2)	-(3)	-(3)	-(3)	-(3)	-(3)	-(3)	A(3)	
	400m	A(1)	-(3)	-(3)	A(2)	A,BiC(1)	-(3)	-(3)	-(3)	-(3)	-(3)	A(3)	
	500m	A(1)	-(3)	-(3)	-(2)	-(2)	A,BiC(2)	A(3)	-(3)	-(3)	-(3)	A(3)	
	600m	A(1)	-(3)	-(3)	-(2)	-(2)	A(1)	A,BiC(1)	A(3)	A(3)	A(3)	A,BiC(3)	
	700m	A(1)	-(3)	-(3)	-(3)	-(2)	-(2)	-(1)	A,BiC(2)	A(3)	A(3)	A,BiC(3)	
	800m	A(1)	-(3)	-(3)	-(3)	-(2)	-(2)	-(2)	-(1)	A,BiC(1)	A,iB(2)	A,BiC(3)	
	900m	A(1)	-(3)	-(3)	-(3)	-(2)	-(2)	-(2)	-(1)	-(2)	A,iC(2)	A,BiC(3)	
	1000m	-(1)	-(3)	-(3)	-(3)	-(2)	-(2)	-(2)	-(1)	-(2)	-(1)	A,BiC(3)	

Oznaka "-"- znači da nije energetski preopterećen niti jedan UPZ klase II / The sign "-"- means that no one SPD class II is energy overloaded

Kako se vidi iz tablice 3, mjesto udara munje mijenja se od transformatorske stanice pa do kraja mreže u koraku 100 m. Također, mjesto priključka objekta mijenja se od početka pa do kraja NN mreže. Udar munje je uvijek najviši vodič (faza A), što je u skladu s elektro-geometrijskim modelom udara. Neposredno nakon udara, u najvećem broju slučajeva, dolazi do preskoka na fazu B, zatim na C i na kraju na PEN (neutralni vodič sa zaštitnom funkcijom) vodič. Oznake A, B i C u tablici 3 označavaju energetski preopterećen UPZ klase II, u KPMO-u priključenog objekta, u dotičnoj fazi. Oznake (1), (2) i (3) u tablici 3 označavaju broj energetski preopterećenih UPZ-a klase II u TS, za dani slučaj mjesta udara munje i mjesta priključka objekta.

Kao kriterij energetskog preopterećenja svih UPZ-a usvojena je granica 1,5 kJ. Naime, postoje UPZ-i klase II nazivne struje 20 kA i maksimalne struje 65 kA (pa i 150 kA). Grubo se može usvojiti da UPZ klase II može 20 puta odvesti nazivnu struju, a najmanje 1 puta maksimalnu struju [9]. Ako se struja valnog oblika 8/20 μ s amplitude 65 kA utisne u takav UPZ, dobije se disipirana energija veća od 2 kJ. Uzimajući u obzir mogućnost višestrukog udara munje, usvojena je energija 75 % izračunate, 1,5 kJ. Dakle, usvojen je kriterij, UPZ klase II (na bazi MO pločice) energetski je preopterećen ako je, pri udaru munje u NN mrežu, apsorbirao energiju veću od 1,5 kJ.

As seen from Table 3, the distance of the lightning stroke from the transformer station increases from the transformer station to the end of the network in increments of 100 m. Furthermore, the location of the building connection changes from the beginning to the end of the low-voltage network. Lightning always strikes the highest conductor (Phase A), which is in agreement with the electro-geometric stroke model. Immediately after the stroke, in the majority of cases there will be arcing to Phase B, then Phase C and finally to the PEN (Protection Earth Neutral) conductor. The designations A, B and C in Table 3 indicate an energy overloaded Class II SPD, located at the service entrance of a connected building, in the corresponding phases. The designations (1), (2) and (3) in Table 3 indicate the number of energy overloaded Class II SPDs at the transformer station for the given lightning stroke and building connection locations.

As the criterion for the energy overloading of all SPDs, the limit of 1,5 kJ has been adopted. There are Class II SPDs with a nominal current of 20 kA and maximum current of 65 kA (and even 150 kA). It can be roughly adopted that a Class II SPD can divert its nominal current 20 times, and its maximum current at least once [9]. When an 8/20 μ s current wave of an amplitude of 65 kA is impressed into such a SPD, more than 2 kJ of dissipated energy is obtained. Taking into account the possibility of multiple lightning strokes, 75% of the calculated energy or 1,5 kJ is adopted. Thus, the adopted criterion for an overloaded Class II SPD (based on an MO disc) in a low-voltage network is when the absorbed energy from a lightning stroke is greater than 1,5 kJ.

Analizom rezultata iz tablice 3 zaključuje se da je preopterećenje UPZ-a klase II u KPMO-u češće za udar munje u NN mrežu kod TS, UPZ-i u fazama A, B i C u KPMO-u energetski su preopterećeni samo ako je udar munje i priključak objekta na istom mjestu, ili eventualno udaljen 100 m, u nekim slučajevima. Za objekt priključen na NN mrežu više od 100 m od mjesta udara munje, niti jedan UPZ u KPMO-u nije preopterećen. Sličan zaključak vrijedi približno prvih 700 m od TS. Ako se pogledaju udaljenosti, 800 m, 900 m, vidi se da su UPZ-i u KPMO-u sada preopterećeni i za slučaj priključka nešto dalje od mjesta udara munje. Odgovor zašto je to tako krije se u sljedećoj činjenici. Utisnuti strujni val prijeđe cijelu udaljenost od 1 km za cca 3,3 μ s a kako je riječ o relativno dugom valu (amplitude 88,8 kA valnog oblika 9/189 μ s), jasno je da dolazi do višestrukih refleksija prije negoli je cijeli val i utisnut u NN mrežu.

Na mjestu utiskivanja struje, u pravilu, dolazi do preskoka između svih faznih vodiča, a također je modelirana i mogućnost preskoka na svakom stupu na kojemu je PEN vodič povezan sa zemljom. Na pojedinim od tih stupova također dolazi do preskoka između pojedinih ili svih vodiča. To je jedan od načina na koji se energija struje munje odvodi u zemlju. Kako je PEN vodič povezan sa zemljom svakih 200 m, to nije razlog za "nesimetriju" rezultata u tablici 3. Razlog se krije u činjenici da na strani TS postoje dva sloga od tri UPZ-a klase II, jedan u ormaru TS, a drugi na prvom stupu ispred TS. Suprotno tomu, na kraju NN mreže samo je jedan slog UPZ-a na zadnjem stupu. Poznato je izvanredno svojstvo MO odvodnika (UPZ klase II), koje nemaju odvodnici na bazi iskrišta (UPZ klase I), da dijele energiju koju odvođe. Ovo je očigledan primjer tog izvanrednog svojstva. Udari munje u NN mrežu kod TS (udaljenost 0 m) i sam kraj mreže (udaljenost 1000 m) uzrokuju veće energetske opterećenje UPZ-a u KPMO-u, zbog toga jer UPZ-i u TS i na kraju mreže smanjuju prenapon te sprečavaju preskok između faznih vodiča međusobno, a i prema PEN vodiču. Na taj se način cijela energija udara munje odvodi UPZ-ima, što rezultira većim energetske opterećenjem svih UPZ-a.

Ako se napravi suma svih slučajeva, dobije se sljedeći omjer. Od 363 moguća dobiveno je u 66 slučajeva energetske preopterećenje UPZ-a klase II u KPMO-u objekta, što je relativna frekvencija preopterećenja od približno 18,2 %. S obzirom na usvojenu vjerojatnost pojave amplitude struje munje i usvojenu najnepovoljniju situaciju samo jednog priključka, to je ohrabrujući rezultat i

Through analysis of the results from Table 3, it is concluded that the overloading of Class II SPDs in the service entrance due to lightning strokes in a low-voltage network is more frequent at the transformer station and at the end of the network. At a distance of 100 m from the transformer station, the SPDs in Phases A, B and C at the service entrance are overloaded only if the lightning stroke and building connection are in the same location, or eventually at a distance of 100 m in some cases. For a building connected to a low-voltage network over 100 m from the site of the lightning stroke, not a single SPD at a service entrance was overloaded. A similar conclusion applies for approximately the first 700 m from the transformer station. If distances of 800 m and 900 m are considered, it is seen that the SPDs at service entrances are also overloaded in the case of a connection somewhat further from the site of the lightning stroke. The answer to why this is so lies in the following fact. An impressed current wave travels at a distance of 1 km for approximately 3,3 μ s. Since this is a relatively long wave (amplitude 88,8 kA, 9/189 μ s waveform), it is clear that there are multiple reflections before the entire wave is impressed in the low-voltage network.

At the site of current impression, as a rule there is flashover between all the phase conductors, and the possibility of flashover is also modeled for every pole on which a PEN conductor is connected to the ground. On some of these poles, there are also flashovers among individual or all the conductors. This is one of the ways in which the electrical energy of the lightning current is conducted to the ground. Since a PEN conductor is connected to the ground every 200 m, this is not the reason for the "asymmetry" of the results in Table 3. The reason is concealed in the fact that on the side of the transformer station there are two stacks of three Class II SPDs, one in the transformer station cubicle and the other on the first pole in front of the transformer station. At the end of the low-voltage network, there is only one SPD stack on the last pole. Distribution of surge current among MO arresters (Class II SPDs) is an exceptional property, which lightning current arresters based on spark gap (Class I SPDs) lack. This is an obvious example of such an exceptional property. Lightning strokes to a low-voltage network at a transformer station (at a distance of 0 m) and at the very end of the network (at a distance of 1000 m) cause greater energy overloading of the SPDs at service entrances, because the SPDs at the transformer station and at the end of the network reduce the surge and prevent flashover among phase conductors and also to the PEN conductor. In this manner, the entire energy of a lightning stroke is diverted by the SPDs, resulting in a greater energy load on all the SPDs.

If all the cases are added up, the following ratio is obtained. Out of 363 possible cases, overloading of

navodi na zaključak da je UPZ klase II adekvatan za postavljanje u KPMO.

Treba se još jednom vratiti na nesimetričnost rezultata u tablici 3. Dakle, kada bude više priključaka s UPZ-ima klase II u KPMO-u, situacija će biti znatno povoljnija zbog spomenutog izvanrednog svojstva MO odvodnika da dijele energiju koju odvođe. Što je veći broj priključaka s UPZ-ima klase II u KPMO-u, to je vjerojatnost njihova energetskog preopterećenja manja.

U simulacijama je računato, osim energetskog opterećenja UPZ-a klase II u KPMO-u, i energetsko opterećenje UPZ-a klase II u stupnoj TS. Naime, za UPZ u stupnoj TS i u Europi a i u Hrvatskoj prihvaćeno je da bude klase II (MO). Usvojeni kriterij energetskog preopterećenja je isti kao i za UPZ u KPMO-u. Dakle, ako je energija koju apsorbira UPZ pri udaru munje u NN mrežu veća od 1,5 kJ, tada je taj UPZ energetski preopterećen. Rezultati u tablici 3. su iznenađujući. Gotovo svaki udar u NN mrežu rezultira energetskim preopterećenjem jednog, dva ili tri UPZ-a klase II u TS. Ako se izračuna relativna frekvencija energetskog preopterećenja UPZ-a klase II u TS, dobije se 71,3 % (259/363). Također, niti kondenzator za kompenzaciju jalove snage ne smanjuje energetsko opterećenje UPZ-a u TS, što bi se očekivalo. Kondenzator u prvom trenutku prima energiju, ali kako je riječ o dugom valu, napon na kondenzatoru poraste te UPZ počinje voditi struju. Zatim se akumulirana energija u kondenzatoru prazni, prema zemlji, kroz UPZ u TS. Dakle, kondenzator za kompenzaciju u TS ne smanjuje energetsko opterećenje UPZ-a.

Kako je ovaj rezultat ipak iznenađujući, provedena je usporedba sa stvarnim stanjem. U jednom distribucijskom području u kontinentalnoj Hrvatskoj, čija mreža odgovara simuliranom primjeru, pregledano je desetak stupnih TS s ugrađenim UPZ-ima klase II na NN strani. Naravno, prava statistička usporedba nije se mogla napraviti zbog sljedećih razloga:

- nepostojanja nikakve sustavnosti u odabiru UPZ-a na NN u TS (svi su klase II, ali različitih proizvođača i različitih nazivnih struja $I_n = 5$ i 10 kA),
- neprovođenja periodičnog niti bilo kakvog drugog pregleda UPZ-a na NN u TS,
- samo pojedine TS, odnosno NN izvodi imaju montiran i UPZ klase II na prvom stupu NN mreže ispred TS,
- nepostojanja praktično niti jednog objekta u NN mreži koji u KPMO-u ima ugrađenu bilo kakvu prenaponsku zaštitu.

the Class II SPDs at the service entrances was noted in 66, a relative overload frequency of approximately 18,2%. Taking into account the adopted value for the occurrence of lightning current amplitude and the adopted worst-case scenario for only one connection, this is an encouraging result and leads to the conclusion that Class II SPDs are adequate for installation at service entrances.

It is necessary to return once again to the asymmetry of the results in Table 3. When there are several connections with Class II SPDs at a service entrance, the situation will be significantly more favorable due to the previously noted exceptional property of an MO varistor to distribute the surge current. The more connections to Class II SPDs at a service entrance, the lower the probability of their becoming overloaded.

In the simulations, in addition to the energy load of the Class II SPDs at the service entrance, the energy load of the Class II SPD at the pole-mounted transformer station is calculated. For SPDs on pole-mounted transformer stations in Europe and in Croatia, it has been accepted that they should be Class II (MO). The adopted criterion for energy overloading is the same for an SPD at a service entrance. Hence, if the energy absorbed by an SPD from a lightning strike in a low-voltage network is greater than 1,5 kJ, the SPD is overloaded. The results in Table 3 are surprising. Nearly every stroke to a low-voltage network results in the energy overloading of one, two or three Class II SPDs at the transformer station. If the relative frequency of the overloading of Class II SPDs at transformer stations is calculated, 71,3 % (259/363) is obtained. Furthermore, the condenser for reactive power compensation does not reduce the energy load of the SPD at the transformer station, as would be expected. At the first moment, the condenser receives energy but since this is a long wave, the voltage at the condenser increases and the SPD begins to conduct current. Then the accumulated energy in the condenser discharges to the ground, through the SPD at the transformer station. Therefore, the condenser for reactive power compensation in a transformer station does not reduce the energy load of the SPD.

Since this result was unexpected, a comparison was performed with an actual situation. In a distribution network in continental Croatia, which corresponds to the simulated example, ten pole-mounted transformer stations with installed Class II SPDs on the low-voltage side were inspected. Naturally, it was not possible to perform a proper statistical comparison for the following reasons:

- the SPDs in the transformer stations of the low-voltage network had not been selected systematically. (They were all Class II SPDs but

Ipak, pregledom spomenutih desetak TS uočeno je da postoji određeni broj pokvarenih UPZ-a klase II (pokvaren ovdje znači da je proradio toplinski rastavni uređaj i odvojio UPZ od NN mreže). Veliki dio tih kvarova može se pripisati energetsom preopterećenju. Svi pokvareni UPZ-i klase II bili su nazivne struje 5 kA. Također, rezultat pregleda ovog malog skupa je da je u pojedinim TS pokvaren jedan NN UPZ klase II, u pojedinim dva, a nije pronađena niti jedna TS (od desetak pregledanih) sa sva tri pokvarena UPZ-a. Slično je zapaženo i u simulacijama: rezultat simulacije je u nekim slučajevima jedan preopterećen UPZ u TS, a u drugima dva, odnosno tri.

Dakle, simulacija pokazuje da će mnogo češće biti energetski preopterećen UPZ klase II u TS (a također i na prvom stupu) nego u KPMO-u priključenog objekta.

Kako (u Hrvatskoj) ipak postoji stanovito iskustvo s NN UPZ-ima klase II u stupnim TS i u NN mreži, kao kriterij za izbor UPZ-a za KPMO može poslužiti i usporedba relativne frekvencije energetskog preopterećenja istih s onim u TS.

3.2.2 Utjecaj ulaznih parametara na rezultate simulacija

Razmatran je utjecaj vrijednosti otpora uzemljenja objekta na energetske opterećenje UPZ-a klase II u KPMO-u, [10]. Najkraće se može kazati, povećanje otpora uzemljenja objekta, bez sustava zaštite od munje, smanjuje energetske opterećenje UPZ-a u KPMO-u objekta. U tom smislu, za objekt koji se projektira bez sustava zaštite od munje, a s prenaponskom zaštitom, nije potrebno dodatno ulagati u uzemljivač (iznad zahtjeva primijenjene zaštitne mjere) s idejom da bi se poboljšala prenaponska zaštita. Uputnije je uložiti sredstva na sustavno izjednačavanje potencijala u objektu nego na uzemljivač niskog otpora uzemljenja.

Razmatran je također i utjecaj vrijednosti otpora uzemljenja nultog vodiča duž NN mreže na energetske opterećenje UPZ-a klase II u KPMO-u, [10]. Najkraće se može kazati, povećanje vrijednosti otpora uzemljenja nultog vodiča duž NN mreže ili nepostojanje tih uzemljenja nema velik utjecaj na energetske opterećenja UPZ-a u KPMO-u. S druge strane, ako se pogleda utjecaj povećanja otpora uzemljenja nultog vodiča duž NN mreže na energetske opterećenje UPZ-a u TS, jasan je nepovoljan utjecaj. Stoga se zaključno može kazati, smanjenje otpora uzemljenja nultog vodiča duž NN mreže je povoljno za prenaponsku zaštitu cjelokupne NN mreže.

from different manufacturers and had different rated currents, $I_n = 5$ and 10 kA),

- there had been no periodical or any other inspections of the SPDs in the transformer stations of the low-voltage network,
- only some of the transformer stations or low-voltage connection points had Class II SPDs installed on the first poles of the low-voltage network or in front of the transformer stations,
- there were practically no buildings in the low-voltage network with any surge protection installed at the service entrances.

Nonetheless, during the inspection of these ten transformer stations, it was noted that there was a certain number of Class II SPDs that were out of order, i.e. thermally sensitive fuses had disconnected the SPDs from the low-voltage network. A high percentage of these failures can be attributed to energy overloading. All the Class II SPDs that were out of order had a nominal current of 5 kA. Furthermore, the results of the inspection of this small group showed that in some of the transformer stations one low-voltage Class II SPD was out of order, in some two, but not a single transformer station was found (of the ten inspected) in which all three of the SPDs were out of order. A similar observation was made in the simulations, so that in some cases there was one overloaded SPD at a transformer station, and in others two or three.

Hence, simulation demonstrates that Class II SPDs at a transformer station (and also on the first pole) are much more frequently overloaded than at the service entrances of connected buildings.

Since there has been some experience in Croatia with low-voltage Class II SPDs installed at pole-mounted transformer stations and in low-voltage networks, criteria for the selection of the SPDs for service entrances can be based upon comparison of the relative frequencies of the energy overloading of the SPDs at such locations with those at transformer stations.

3.2.2 The impact of input parameters on the simulation results

The impact of the ground resistance value of buildings on the energy loads of Class II SPDs at service entrances has been studied [10]. It can briefly be stated that the increase of a building's ground resistance value, without a lightning protection system, reduces the energy loading on the SPDs at the service entrance of the building. In this sense, for a building that is designed without a lightning protection system but with surge protection, it is not necessary to make further investment in the grounding system (above the requirements of the protective measure applied) with the idea of improving surge protection. It is more advisable to invest in systematic potential equalizing in the building than in low resistance grounding.

Razmatran je i utjecaj broja priključenih objekata koji imaju UPZ klase II u KPMO-u na energetska opterećenja UPZ-a, [10]. Povećanje broja priključenih objekata s UPZ-ima u KPMO-u smanjuje vjerojatnost njihova energetskeg preopterećenja pri udarima munje u NN mrežu. To se moglo i očekivati jer je poznata činjenica, a koja je i prije spomenuta, da UPZ-i klase II (kao i bili koji drugi odvodnici prenapona na MO bazi) imaju svojstvo da dijele struju, odnosno energiju koju odvođe u zemlju, na način da svaki UPZ odvođe dio ukupne energije.

4 ZAKLJUČNO RAZMATRANJE

Razvijena metoda izbora UPZ-a u NN sustavima sastoji se od sljedećeg: za svaku tipičnu primjenu UPZ-a napravi se odgovarajući EMTP-ATP model. Usvoji se prihvatljivi rizik kvara zbog energetskeg preopterećenja UPZ-a klase II. Prema usvojenom riziku odabire se odgovarajuća struja munje. Provode se simulacije udara munje i računa energetska opterećenja UPZ-a. Simulacijama dobivena relativna frekvencija energetskeg preopterećenja povezuje se s usvojenim rizikom te donosi zaključak je li UPZ klase II adekvatan za primjenu.

Metoda je testirana i na preciznijem rasteru (kombiniranjem mjesta priključka i mjesta udara po 33 m, odnosno 35 m, što je jedan raspon NN mreže) [10]. Precizniji raster daje još povoljnije rezultate, odnosno potvrđuje mogućnost primjene UPZ-a klase II za razmatranu NN mrežu. To nadalje znači da se grubi raster može koristiti u praktičnim primjenama, a da će dobiveni rezultati biti na strani sigurnosti.

Primjenom ovakve metode, za različite tipične primjene UPZ-a, može se zaključiti kakav UPZ je adekvatan.

The impact of the neutral ground resistance value of the conductor along a low-voltage network upon the energy loading of a Class II SPD at a service entrance [10] was also studied. It can be briefly stated that an increase in the neutral ground resistance values along a low-voltage network or the lack of such grounding does not have a great impact upon the energy loading of an SPD at a service entrance. On the other hand, when the impact of an increased neutral ground resistance value along a low-voltage network on the energy loading of a SPD at a transformer station is studied, the undesirable impact is clear. Therefore, in conclusion it may be stated that reducing the neutral ground resistance value of the conductor along a low-voltage network has a favorable impact on the surge protection of the entire low-voltage network.

The impact was also studied of the number of connected buildings that have Class II SPDs in their service entrances on the energy loading of an SPD [10]. In a low-voltage network, an increased number of connected buildings with SPDs installed at the service entrances reduces the probability of their energy overloading during lightning strokes. This could be anticipated because it is known, as previously mentioned, that Class II SPDs (like any other MO-based surge arresters) have the property to distribute current, that is, the energy they divert to the ground, so that each SPD diverts a part of the total energy.

4 CONCLUSION

A method for choosing SPDs in low-voltage systems has been developed, as follows: A suitable EMTP-ATP model should be prepared for each typical application. The acceptable risk of failure due to the energy overloading of a Class II SPD is adopted. The corresponding lightning current is chosen according to the adopted risk. Lightning stroke simulation is performed and the energy loading of the SPD is calculated. Through simulations, the relative frequency of energy overloading is obtained, which is then correlated with the adopted risk, on the basis of which it is concluded whether a Class II SPD would be adequate.

This method has also been tested on a more precise scale by combining the locations of the connections with the locations the lightning strokes in increments of 33 m, or respectively 35 m, which represents one segment of a low-voltage network [10]. A more precise scale yields more accurate results, i.e. confirms the possibility for the application of Class II SPDs in the low-voltage network being considered. Furthermore, this means that a rough scale can be used in practical applications and the results obtained will be on the side of safety.

Through the application of such a method, it is possible to determine which SPDs are suitable for various typical applications.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] IEC 61643-1 (2002-01) Ed. 1.1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Part 1: Performance requirements and testing methods.
- [2] IEEE C62.45-2002: Recommended practice on surge testing for equipment connected to low-voltage ac power circuits.
- [3] E DIN VDE 0675-6:1989-11: Surge arresters for use in a.c. supply systems with rated voltages ranging from 100 V to 1000 V as well as the Annexes Part 6/A1:1996-03 and Part 6/A2:1996-10.
- [4] HASSE, P., Überspannungsschutz von Niederspannungsanlagen - Betrieb elektronischer Geräte auch bei direkten Blitzeinschlägen, TÜV-Verlag GmbH, Köln, 1998.
- [5] GLUSHAKOW, B., NERI, D., A Call to Standardize the Waveforms Used to Test SPDs, 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, 13-16 September 2004.
- [6] IEEE Working Group 15.08.09: Modelling and Analysis of System Transients Using Digital Programs, 1998.
- [7] IEEE Working Group: A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. 104, No. 4, April 1985.
- [8] CIGRE, Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission lines, Paris, October 1991.
- [9] ROUSSEAU, A., PERCHE, T., Coordination of Surge Arresters in the Low Voltage Field, INTELEC '95 (17th International Telecommunications Energy Conference), Soule, Bagnères de Bigorre, France, 29 Oct.-1 Nov. 1995.
- [10] MILARDIĆ, V., Metoda izbora uređaja prenaponske zaštite u niskonaponskim sustavima, doktorska disertacija, FER Zagreb, studeni 2005.

Uredništvo primilo rukopis:
2006-03-28

Manuscript received on:
2006-03-28

Prihvaćeno:
2006-04-16

Accepted on:
2006-04-16

UPUTE AUTORIMA

UPUTSTVO ZA RUKOPIS

1. Časopis Energija objavljuje članke koji do sada nisu objavljeni u nekom drugom časopisu.
2. Radovi se pišu na hrvatskom ili engleskom jeziku, u trećem licu, u jednoj stranici papira, počinju s uvodom i završavaju sa zaključkom, u dvostrukom proredu i s dostatnim marginama. Stranice se označavaju uzastopnim brojevima.
3. Radovi u pravilu ne mogu biti dulji od 14 stranica časopisa Energija (oko 9000 riječi).
4. Ime i prezime autora, znanstvena ili stručna titula, naziv i adresa tvrtke u kojoj autor radi i e-mail adresa navode se odvojeno.
5. Iznad teksta samoga rada treba biti sažetak od najviše 250 riječi. Sažetak treba biti zaokružena cjelina razumljiva prosječnom čitatelju izvan konteksta samoga rada. Nakon sažetka navode se ključne riječi.
6. Članci se pišu u Word-u sa slikama u tekstu ili u posebnim file-ovima u tiff formatu, 1:1, rezolucije namanje 300 dpi.
7. Članci se pišu bez bilješki na dnu stranice.
8. Matematički izrazi, grčka slova i drugi znakovi trebaju biti jasno napisani s dostatnim razmacima.
9. Literatura koja se koristi u tekstu navodi se u uglatoj zagradi pod brojem pod kojim je navedena na kraju članka. Korištena literatura navodi se na kraju članka redom kojim je spomenuta u članku. Ako rad na koji se upućuje ima tri ili više autora, navodi se prvi autor i potom et al. Nazivi časopisa se navode u neskrćenom obliku.

Časopis

[1] FRAZIER, L., FODOR, J. D., The sausage machine: A new two-stage parsing model. *Cognition*, 6 (1978), 291- 325

Knjiga

[5] NAGAO, M., *Knowledge and Inference*. Academic Press, Boston, 1988.

Referat

[7] WATROUS, R. L., SHASTRI, L., Learning phonetic features using connectionist networks: An experiment in speech recognition. Presented at the Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, (1987) San Diego, CA

Neobjavljeno izvješće/teze

[10] ROZENBLIT, J. W., A conceptual basis for model-based system design. PhD Thesis, Wayne State University, Detroit, Michigan, 1985.

10. Članak je prihvaćen za objavljivanje ako ga pozitivno ocijene dva stručna recenzenta. U postupku recenzije članci se kategoriziraju na sljedeći način:
 - izvorni znanstveni članci - radovi koji sadrže do sada još neobjavljene rezultate izvornih istraživanja u potpunom obliku,
 - prethodna priopćenja - radovi koji sadrže do sada još neobjavljene rezultate izvornih istraživanja u preliminarnom obliku,
 - pregledni članci - radovi koji sadrže izvoran, sažet i kritički prikaz jednog područja ili njegova dijela u kojem autor i sam aktivno sudjeluje - mora biti naglašena uloga autorovog izvornog doprinosa u tom području u odnosu na već objavljene radove, kao i pregled tih radova,
 - stručni članci - radovi koji sadrže korisne priloge iz struke i za struku, a ne moraju predstavljati izvorna istraživanja.
11. Članci se lektoriraju i provodi se metrološka recenzija.
12. Članci se dostavljaju u elektroničkom obliku i 1 primjerak u tiskanom obliku na adresu:
HEP d.d. - Energija
N/r tajnika Uređivačkog odbora - mr. sc. Slavica Barta-Koštrun
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Hrvatska
Tel.: +385 (1) 632 2641
Faks: +385 (1) 617 0438
e-mail: slavica.barta@hep.hr

KOREKTURA I AUTORSKI PRIMJERC I

1. Autori su dužni izvršiti korekturu svoga rada prije objavljivanja. Veće promjene teksta u toj fazi neće se prihvatiti.
2. Autori dobivaju besplatno 5 primjeraka časopisa u kojemu je objavljen njihov članak. Naknada za objavljeni članak obračunava se prema Odluci o visini autorskih honorara časopisa Energija.

AUTORSKO PRAVO

1. Autorsko pravo na sve objavljene materijale ima časopis Energija.
2. Autori moraju telefaksom dostaviti popunjeni obrazac o autorskom pravu nakon prihvaćanja članka.
3. Autori koji žele koristiti materijale koji su prethodno objavljeni u časopisu Energija trebaju se obratiti izdavaču.

MANUSCRIPTS

1. Energija journal publishes articles never before published in another periodical.
2. Articles are written in Croatian or English, in the third person, on one paper side, beginning with an introduction and ending with a conclusion, with double line spacing and adequate margins. Pages are numbered consecutively.
3. As a rule articles cannot exceed 14 pages of the Energija journal (about 9000 words).
4. The name of the author and his/her academic title, the name and address of the company of the author's employment, and e-mail address, are noted separately.
5. The text of the article is preceded by a summary of max. 250 words. The summary is a rounded off whole comprehensible to an average reader apart from the context of the article. The summary is followed by the listing of the key words.
6. Articles are written in MS Word with pictures embedded or as separate TIFF files, 1:1, min. 300 dpi.
7. Articles are written without bottom-of-page footnotes.
8. Mathematical expressions, Greek letters and other symbols must be clearly written with sufficient spacing.
9. The sources mentioned in the text of the article are only to be referenced by the number under which it is listed at the end of the article. References are listed at the end of the article in the order in which they are mentioned in the text of the article. If a work referenced has three or more authors, the first author is mentioned followed by the indication et al. Names of journals are given in full.

Journal

[1] FRAZIER, L., FODOR, J. D., *The sausage machine: A new two-stage parsing model.* *Cognition*, 6 (1978), 291-325

Book

[5] NAGAO, M., *Knowledge and Inference.* Academic Press, Boston, 1988.

Conference paper

[7] WATROUS, R. L., SHASTRI, L., *Learning phonetic features using connectionist networks: An experiment in speech recognition. Presented at the Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, (1987) San Diego, CA*

Unpublished report/theses

[10] ROZENBLIT, J. W., *A conceptual basis for model-based system design. PhD Thesis, Wayne State University, Detroit, Michigan, 1985.*

10. An article will be accepted for publication if it is positively evaluated by two professional reviewers. In the review, articles are categorised as follows:
 - original scientific articles - works containing hitherto unpublished full results of original research,
 - preliminary information - works containing hitherto unpublished preliminary results of original research,
 - review articles - works containing the original, summarized and critical review from the field or from a part of the field in which the author of the article is himself/herself involved - the role of the author's original contribution to the field must be noted with regard to already published works, and an overview of such works provided,
 - professional articles - works containing useful contributions from the profession and for the profession, not necessarily derived from original research.
11. Articles will undergo language editing and metrological reviews.
12. Articles are to be submitted in a machine-readable form plus one printout to the following address:
HEP d.d. - Energija
N/r tajnika Uređivačkog odbora - mr. sc. Slavica Barta-Koštrun
Ulica grada Vukovara 37, 10000 Zagreb, Croatia
Tel.: +385 (1) 632 2641
Fax: +385 (1) 617 0438
e-mail: slavica.barta@hep.hr

CORRECTIONS AND FREE COPIES FOR AUTHORS

1. Authors are required to make the corrections in their works prior to publication. Major alterations of the text at the stage of publication will not be accepted.
2. Authors will receive free of charge 5 copies of the Journal in which their respective articles appear. The fee for an article published will be calculated in accordance with the Decision on the Fees for the Authors of the Energija journal.

COPYRIGHT

1. The copyright on all the materials published belongs to the Energija journal.
2. Authors must fax in a filled out copyright form when their articles have been accepted.
3. Authors wishing to use the materials published in the Energija journal need to contact the publisher.

INSTRU- CTIONS TO AUTHORS



Creating for you today.

The position of the best construction company in South Eastern Europe demonstrates the universal quality of **Dalekovod**, whose products are present in the international market and sold in more than 80 countries around the world. Numerous professional acknowledgements and customers' satisfaction with the quality of our products and services as well as with our honouring of deadlines provide us with the unrivalled motivation for constant dedicated work, new successes in the market and confirmation of our business vision - value is in durability.



Hrvatska - Tesla - Svijet

Croatia - Tesla - World

2006. - GODINA NIKOLE TESLE

2006 - THE YEAR OF NIKOLA TESLA

 HEP

